

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FURADEIRA DE COORDENADAS
COM COMANDO NUMÉRICO
PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

PAULO ANDRÉ DE CAMARGO BELTRÃO

FLORIANÓPOLIS, JANEIRO DE 1991

FURADEIRA DE COORDENADAS
COM COMANDO NUMÉRICO
PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

PAULO ANDRÉ DE CAMARGO BELTRÃO


ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

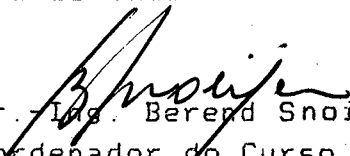
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : FABRICAÇÃO,

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Dr.-Ing. Carlos Alberto Martin
- Orientador -

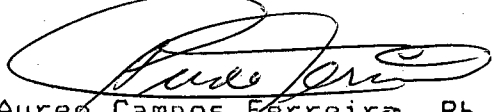


Prof. Dr.-Ing. Berend Snoijer
- Coordenador do Curso -

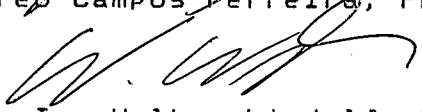
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr.-Ing Carlos Alberto Martin
- Presidente -



Prof. Aureo Campos Ferreira, Ph.D



Prof. Dr.-Ing Walter Lindolfo Weingaertner

Este trabalho é dedicado
Aos meus pais, Paulo e
Vânia, pelo exemplo; a
meus irmãos Francisco,
João, Anna e Haroldo, pelo
apoio; a minha esposa
Stela, pelo companheirismo
e a meus amigos, pelo
incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof^o Dr. Ing. Carlos Alberto Martin, pela orientação, amizade, paciência e apoio, que foram fundamentais para a realização deste trabalho;

Aos Professores Aureo C. Ferreira e Walter L. Weingartner, pela colaboração e participação na banca examinadora desta dissertação;

Aos Professores Douglas Renaux e Maurizio Tazza, pelo apoio e sugestões para este projeto;

Ao CEFET-PR, representado pelo Diretor-Geral Prof^o Artur Antônio Bertol, pelo financiamento e incentivo na realização do projeto;

Aos Professores Ernani A. Brescianini e Eden J. Netto, que permitiram o desenvolvimento do projeto em paralelo a outras atividades de minha responsabilidade;

Aos colegas Pós-graduandos de Engenharia Mecânica da UFSC, cujo incentivo e auxílio foram determinantes para a conclusão do trabalho;

Ao Técnico Mecânico Mário Alfredo Ferreira, pela amizade e confecção das peças mecânicas do protótipo;

Ao Prof^o Bertoldo Schneider Júnior, pela amizade e ajuda na confecção da dissertação;

Ao Prof^o Cion Cassiano Basso, pelo auxílio durante o desenvolvimento do protótipo;

À CNEN, pela bolsa de estudo e ao CONCITEC, pelos recursos para aquisição da bibliografia;

Finalmente, a todos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e do CEFET-PR, que contribuíram para que esta dissertação pudesse ser realizada com sucesso, o eterno agradecimento.

ÍNDICE

- RESUMO.....	i
- ABSTRACT.....	ii

I- INTRODUÇÃO

1.1.- Formulação do Problema.....	01
1.2.- Processo de Furação.....	03
1.3.- Furação de Placas de Circuito Impresso utilizando Máquinas Manuais e Automáticas	03
1.4.- Utilização de Máquinas Computadorizadas	05
1.5.- Furação de Placas de Circuito Impresso no Contexto Nacional	07
1.6.- Exposição do Trabalho.....	08

II- PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

2.1.- Histórico.....	10
2.2.- Tipos de Placas de Circuito Impresso.....	11
2.2.1.- Placa de Face Simples.....	11
2.2.2.- Placa de Dupla Face.....	11
2.2.3.- Placa Multicamadas.....	11
2.3.- Material para Placas de Circuito Impresso.....	12
2.3.1.- Material Condutor.....	13
2.3.2.- Material Isolante.....	13

2.3.3.- Dimensões Normalizadas dos Laminados.....	15
2.4.- Concepção de uma Placa de Circuito Impresso.....	15
2.4.1.- Fases de Projeto.....	15
2.4.2.- Fases de Fabricação.....	16
2.5.- Processos de Impressão da Imagem Condutora.....	18
2.5.1.- Impressão Serigráfica.....	18
2.5.2.- Impressão Fotográfica.....	18
2.6.- Processos de Produção de Placas de Circuito Impresso..	
.....	19
2.6.1.- Processo Subtrativo.....	19
2.6.2.- Processo Semi-adição.....	19
2.6.3.- Processo de Adição Total.....	20
2.6.4.- Comparação entre Projetos.....	20
2.7.- Usinabilidade Relativa dos Materiais.....	20
2.7.1.- Furação utilizando Punção.....	21
2.7.2.- Furação utilizando Brocas.....	21
2.8.- Metalização das Furações.....	24
2.9.- Características Necessárias nas Máquinas de Furação	
com Brocas para Placas de Circuito Impresso	24
2.9.1.- Preparação da Máquina de Furação.....	25
2.9.2.- Variáveis de Processo.....	27
2.10.- Utilização de Componentes Montados sob a Superfície	
(SMDs) e Chip - on - Board.	30

2.11.- Utilização de sistemas de Computação na Fase de Projeto e Fabricação.....	31
--	----

III- ELEMENTOS MECÂNICOS E MOTORES

3.1.- Introdução.....	34
3.2.- Componentes Mecânicos.....	34
3.2.1.- Guias de Movimento.....	35
3.2.1.1.- Guias de deslizamento.....	35
3.2.1.2.- Guias de deslizamento Flúidico.....	35
3.2.1.3.- Guias de Rolamento.....	36
3.2.2.- Transmissões Mecânicas.....	38
3.2.2.1.- Fusos de Deslizamento.....	38
3.2.2.2.- Fusos de Esferas Recirculantes.....	38
3.2.2.3.- Sistema Pinhão-Cremalheira.....	40
3.2.2.4.- Transmissão por polias e correias sincronizadoras ou dentadas.....	41
3.2.2.5.- Transmissão por Engrenagens.....	41
3.2.3.- Acoplamentos.....	42
3.2.3.1.- Acoplamentos Oldham.....	43
3.2.3.2.- Acoplamentos de Discos.....	43
3.2.3.3.- Acoplamentos por diafragmas.....	43
3.2.3.4.- Acoplamentos por Corrente.....	44
3.2.3.5.- Acoplamentos de Foles.....	44

3.2.3.6.- Acoplamentos Helicoidais.....	44
3.2.3.7.-Acoplamentos Flexíveis (tipo Falk).....	45
3.3.- Motores.....	45
3.3.1.- Servomotores de corrente contínua.....	45
3.3.2.- Servomotores de corrente alternada.....	46
3.3.3.- Motores de Passo.....	47
3.4.- Sensores.....	55
3.5.- Movimento de corte e Movimento de avanço.....	56

IV- EXECUÇÃO E MONTAGEM DOS SISTEMAS MECÂNICOS E ELETRÔNICOS UTILIZADOS NA FURADEIRA PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO.

4.1.- Introdução.....	58
4.2.- Dimensões da Mesa de Coordenadas X, Y e Z.....	59
4.3.- Base da Máquina.....	61
4.4.- Estrutura de Sustentação.....	62
4.5.- Desenvolvimento das Mecânicas X e Y da Furadeira....	63
4.5.1.- Mesa X e Y.....	64
4.5.2.- Sistemas de Guias.....	64
4.5.3.- Sistemas de Transmissão.....	70
4.5.4.- Acoplamentos Utilizados.....	78
4.5.5.- Motores.....	79
4.6.- Desenvolvimento da Mecânica Z.....	84
4.7.- Desenvolvimento do Conjunto Eletro-eletrônico.....	94

4.7.1.- Microcomputador.....	95
4.7.2.- Eletro-eletrônica das Mecânicas X e Y.....	97
4.7.3.- Eletro-eletrônica da Mecânica Z.....	101
4.8.- Montagem do Conjunto Mecânico e Eletrônico.....	105
4.9.- Programação da Furadeira.....	106
4.9.1.- Inicialização Diagnóstico.....	107
4.9.2.- Parâmetros de inicialização.....	110
4.9.3.- Execução do programa CNC.....	111

V- ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS

5.1.- Introdução.....	112
5.2.- Ensaio Estáticos.....	112
5.2.1.- Ensaio de Rugosidade das Guias.....	113
5.2.2.- Ensaio de Dureza das Guias.....	114
5.2.3.- Ensaio de Posicionamento, Retilidade e Ortogonalidade das mecânicas X, Y e Z da Furadeira.....	115
5.3.- Ensaio Dinâmicos.....	124
5.3.1.- Desenvolvimento da Bancada de Testes de Motores de Passo	124
5.3.2.- Determinação das Rampas de Aceleração e Desaceleração para Motores Utilizados.	126
5.3.3.- Levantamento das Curvas de Torque x Velocidade dos Motores Utilizados	129

5.3.4.- Análise do comportamento funcional dos eixos da mesa. Ensaio experimental.....	132
--	-----

5.3.5.- Ensaio de Excentricidade e Posicionamento da Broca sobre a Posição de Furação da Mecânica Z.....	134
--	-----

VI- CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1.- Conclusão.....	136
----------------------	-----

6.2.- Sugestões para Trabalhos Futuros.....	138
---	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
---------------------------------	-----

APÊNDICE I.....	145
-----------------	-----

APÊNDICE II.....	146
------------------	-----

RESUMO

O aumento da demanda de fabricação de furos com pequenos diâmetros e a maior densidade de componentes montados por área tem levado as indústrias fabricantes de placas de circuito impresso a procurar, cada vez mais, a automação do processo de furação, que tem sido um sério obstáculo ao incremento da velocidade e diminuição dos custos de produção destas.

Com a introdução das Furadeiras com Comando Numérico para Placas de Circuito Impresso no mercado mundial e a diminuição dos custos dos sistemas CAD/CAM/CAE para projetos eletrônicos, conseguiu-se um aumento na produção com maior precisão, além da queda dos custos de fabricação. Apesar disto, a Indústria Nacional fabricante de placas de circuito impresso acabou por não poder se beneficiar deste avanço tecnológico de alto custo, já que no Brasil pouco foi investido no desenvolvimento de uma máquina que atenda às necessidades desta, formada em sua maioria por pequenas e médias empresas.

Com o presente trabalho, procura-se mostrar o desenvolvimento e montagem de um protótipo de Furadeira com Comando Numérico, que se propõe como uma alternativa na furação automatizada de placas, principalmente à base de fibra de vidro, que necessitem de metalização interna do furo, com elevada precisão, alta resolução e custo acessível ao mercado supracitado.

ABSTRACT

The increase of small holes demands and the higher density of mounted components for area have carried the Printed Circuit Board Manufacturers to look for, more and more, the boring process automation, that have being a serious obstacle to increase the speed and decrease the costs of Printed Circuit Board production.

With the introduction of Printed Circuit Board's Boring Machines with Computer Numerical Control in the World market and the cost decreasing of Electronic Design CAD/CAM/CAE Systems, the industries have obtained an increase in production with more precision, beyond the production cost fall. In spite of this, Brazilian Manufacturers of Printed Circuit Boards have not reached the benefit of this costly technological advancement because little has been invested in the country in the development of a machine fulfilling the needs of National industry, mostly small and medium size manufacturers.

With this work, we will try to show the development and assembling of a Printed Circuit Board's Boring Machine with Computer Numerical Control that will be an alternative to the boring automation process specially for glass fiber Printed Circuit boards that need bore metalization, with high precision resolution and accessible cost for this market.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1.1- Formulação do Problema

Nas últimas décadas, verificou-se um aumento vertiginoso, em todas as áreas tecnológicas, na utilização de circuitos eletrônicos, havendo demanda crescente pelo desenvolvimento de equipamentos necessários à sua fabricação. Além disto, paralelamente foi sendo ampliada a densidade de componentes eletrônicos, o que tem contribuído não só para o incremento da capacidade operacional dos mesmos, como também, para a diminuição da relação volume/função. O suporte mecânico dos componentes e suas interligações elétricas são proporcionadas pelas Placas de Circuito Impresso (PCIs).

Segundo as especificações de utilização, estas placas podem ser desenvolvidas variando seu material-base, o tipo de condutor, o número de camadas, a rigidez, etc.

O processo de fabricação das PCIs é composto de várias fases (fig 1.1), dentre as quais está a furação/51/. Para que as placas sejam cada vez menores, é necessário que seja aumentado o número de furos por unidade de área o que é possibilitado por componentes cada vez menores, de tolerâncias cada vez mais apertadas, além do que os mesmos muitas vezes precisam receber metalização interna e graus de precisão de localização elevada.

Por isso, a automação desta fase do processo de fabricação das placas é muito importante. Mas para que isso ocorra efetivamente, é necessário que as furadeiras para PCIs sejam programáveis, isto é de comando numérico, já que a precisão nesse tipo de operação é muito difícil de ser alcançada, principalmente quando os furos são de pequeno diâmetro e as máquinas são totalmente manuais.

O mercado pode portanto oferecer máquinas programáveis que atendam os mais variados tipos de indústrias que formam o parque nacional nessa área.

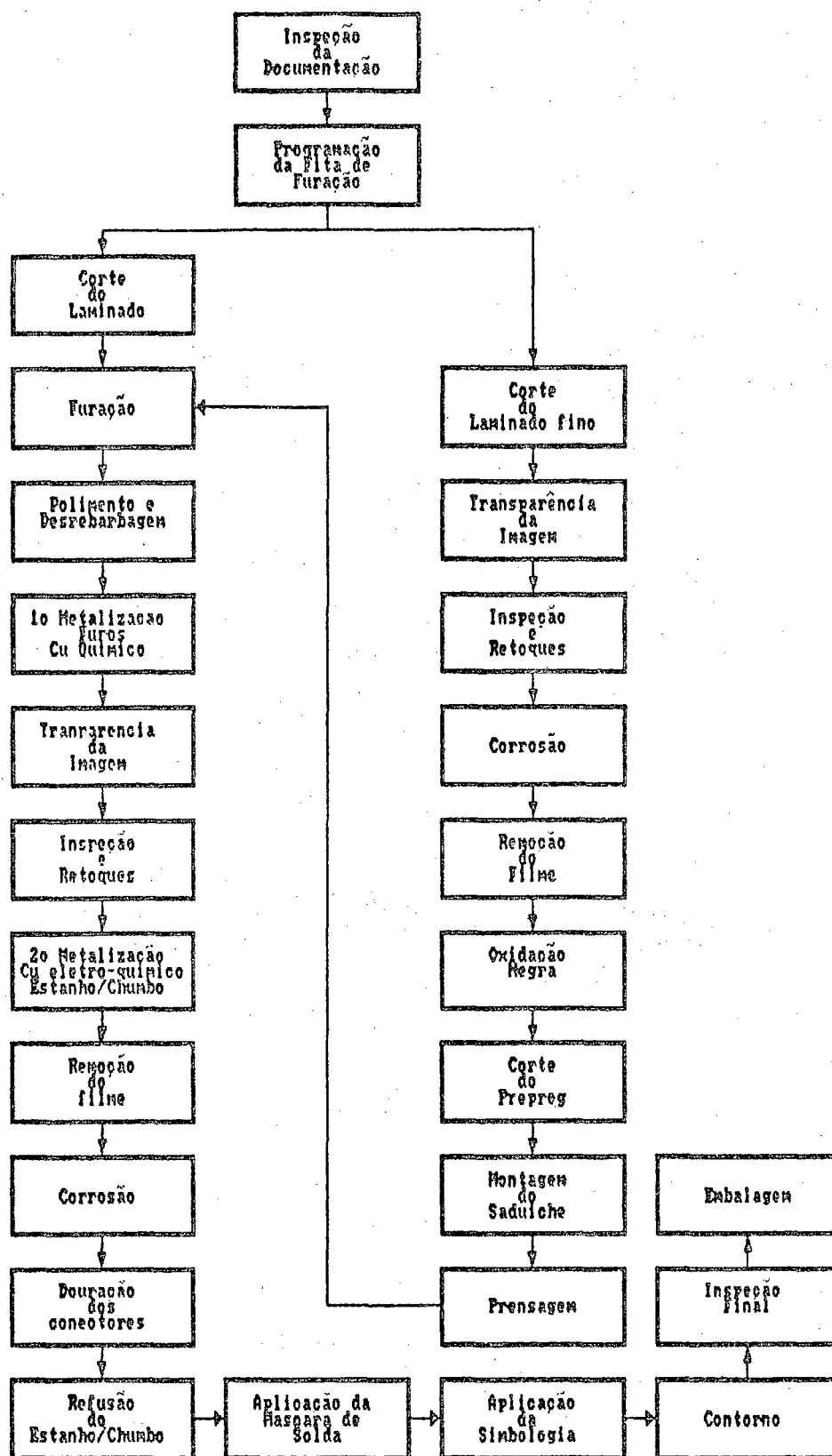


Fig. 1.1.- Processo de fabricação de placas de dupla face e multicamadas.

1.2- Processo de Furação

Furadeira é a máquina empregada em geral, para abrir ou acabar furos, utilizando-se, em cada caso, de uma ferramenta correspondente. É considerada uma máquina especializada porque sua principal função é executar o trabalho acima citado. A furadeira produz furos por processo mecânico, permitindo a utilização mais correta da broca. Esta é a mais antiga máquina operatriz. Atualmente é muito raro encontrar peças que não contenham furos para qualquer fim. Alguns são executados para fins de fixação por meio de rebites e parafusos, exigindo apenas média precisão. Outros são produzidos com exatidão, sendo então a furadeira a máquina indicada na produção seriada.

Já a operação de furar é fase muito importante na fabricação. O termo furação significa obter um furo por um processo qualquer, empregando-se ou não brocas.

A natureza da peça tem um grande efeito na escolha da máquina. Nesta operação, as dimensões, a posição de um furo na peça (tal como um furo profundo interior), ou a natureza do produto (tal como um bloco de motor), podem influir na seleção da máquina para fazer a operação.

Os furos devem ser dimensionados pela profundidade, localização e muitas vezes pelo centro de um em relação ao outro. O dimensionamento em cadeia não satisfaz porque a localização do último depende do anterior, havendo assim uma soma de erros na localização de todos os outros furos. O sistema cartesiano é muito simples e bastante empregado. Muitas vezes as dimensões são dadas em relação a um furo principal, em vez de utilizar as duas linhas nas arestas da peça.

Os métodos para realização de furos em Placas de Circuito Impresso são:

- por meio de brocas para furação de placas à base de fibra de vidro para circuitos de maior confiabilidade;
- por puncionamento para furação de placas à base de fenol e papel para circuitos de menor confiabilidade.

1.3- Furação de Placas de Circuito Impresso utilizando Máquinas Manuais e Automáticas

Placas de Circuito Impresso podem ser fabricadas por técnicas de produção em massa, onde um grande número das mesmas são produzidas através de uma linha de produção. Os métodos de produção são baseados em uma combinação de processos eletro-químicos, mecânicos e de acabamento superficial que contam com uma série de ferramentas de produção utilizadas para conseguir-se qualidade. Um alto volume de

produção de PCIs, entretanto, requer uma série de ferramentas de produção que reduzam o tempo de fabricação e os custos, não podendo ser modificados através do ciclo de produção em um modelo particular de Circuito Impresso. Entretanto, os métodos de produção de massa são ineficientes e custosos para protótipos no estágio de projeto de um novo circuito. Como os preços de sistemas de geração de PCIs em computadores tem caído, existe a possibilidade de projetar circuitos em estações de alto desempenho, permitindo a produção de máscaras de trabalho que aumentam a rapidez de geração de novas placas. Esta rapidez de projeto, em um setor de protótipos, tem induzido uma demanda urgente por métodos que diminuam o tempo de fabricação de tais protótipos, bem como de pequenos e médios lotes. A furação de circuito impresso é um problema em sua fabricação pois é uma etapa de automatização bastante complexa. Um método de produção de massa não poderá ser utilizado, porque as complicações na organização do ferramental introduzem um custo inicial, que só pode ser compensado pelo volume. Outros métodos de furação automática para produzir pequenos lotes de placas, para avaliação de projetos e amostras, são desejáveis. Além disso a produção de uma biblioteca de programas para produção de furação em PCIs é outra área na qual o sistema de furação flexível, é essencial.

Dois métodos de produção podem ser identificados para furação de uma pequena quantidade de placas de circuito impresso. Elas variam do trabalho intensivo da operação de furação manual, para o método de utilização das máquinas de CNC. Existem muitas desvantagens óbvias associadas com a furação manual. A mais desastrosa é a de que há enorme possibilidade de perda de pontos de furação, semelhante se aplicando quando os furos são feitos em locais impróprios. Poucas ações para remediar os erros são necessárias para completar os pontos ou remover o erro de furação. Dependem basicamente do equipamento utilizado na operação de furação, mas a precisão que pode ser atingida com o método manual varia drasticamente. Se leitoras ópticas não são disponíveis na máquina de furação, a precisão contará unicamente com a experiência do operador na movimentação da placa, contra a broca.

Operadores experientes na produção de pequenos lotes de placas que trabalham com furações de pequeno diâmetro e mantêm precisão elevada, são profissionais difíceis de encontrar no mercado. Esse método também sofre maior desvantagem que é a de não ser repetitivo. Não há virtualmente um método de pequeno porte para reduzir o tempo de produção para todas as placas subsequentes. O uso de máquinas CNC elimina os problemas acima citados na furação manual. As máquinas CNC podem ser programadas para todos os pontos necessários, e a verificação cuidadosa, ou verificação gráfica, pode ser feita antes do início da furação. A precisão também pode ser obtida na máquina limitada apenas pela resolução de seu controle

digital de posição. Além disso, similaridades de partes de programas podem ser sempre armazenadas em disquete, de forma que sempre que houver necessidade de utilização do mesmo programa, poderá ser gerada uma biblioteca padrão de PCIs semelhante.

1.4- Utilização de Máquinas Computadorizadas

No início da era industrial, a produção de bens de consumo e bens de capital era toda feita nos países do primeiro mundo. Com o passar do tempo, mais e mais linhas de produção foram sendo transferidas para o terceiro mundo devido à mão de obra barata, as leis trabalhistas menos rígidas, e também para conquista de novos mercados. Graças a estes fatores os países do terceiro mundo conseguiam produzir a preços competitivos, mesmo considerando o transporte dos produtos até o primeiro mundo. Com o advento da robotização e da automação industrial integrada, os países do terceiro mundo estão perdendo esta vantagem relativa. As linhas de produção têm migrado para seus países de origem ou outros que apresentem as vantagens de se ter produção próxima do consumo e do desenvolvimento. Esta situação torna-se perigosa, principalmente para países como o Brasil, que passaram a ter um parque industrial ultrapassado e que não consegue competir em um mercado aberto em muitos setores. A única solução para nosso país é se manter competitivo internacionalmente, e para tal é fundamental acompanhar os processos de modernização da indústria internacional, fornecendo preços e qualidade competitivos, o que torna clara a necessidade do desenvolvimento da automatização das máquinas, principalmente através da utilização do Comando Numérico.

No Comando Numérico as ações de uma máquina são definidas pela utilização de códigos alfa-numéricos de comando. O sistema automaticamente interpreta estes dados através de um computador que a partir destes comanda a máquina /1/.

As Máquinas-Ferramenta Comandadas Numericamente são dotadas de sistemas posicionadores cuja função é assegurar um movimento relativo entre ferramenta e peça correspondente às grandezas de referência precisas introduzidas no computador, e enviadas para a máquina pelo computador do Comando Numérico. O deslocamento da mesa com peça ou da ferramenta de um ponto a outro implica no conhecimento:

- Do posicionador (X, Y, Z ...) no qual se deseja efetuar o deslocamento;
- Das coordenadas do ponto onde posicionar;
- Do sentido do deslocamento;
- Da velocidade do deslocamento da mesa ou da ferramenta.

fita perfurada ou numa fita magnética que serão lidas por um leitor de fitas e processados pelo computador do Comando Numérico, que comandará automaticamente a movimentação do eixo, observando o sentido e a velocidade indicada /53/.

Os deslocamentos são obtidos mecanicamente por uma cadeia cinemática constituída de um motor, um sistema de transmissão, geralmente fuso de esferas recirculantes, que movimenta a mesa da máquina ferramenta. O motor é geralmente alimentado por um variador de velocidade equipado de um sistema de regulação.

Com base nos tipos de sistemas posicionadores pode-se diferenciar fundamentalmente os tipos de Máquinas com Comando Numérico:

- Sistema de Malha Aberta (Comando)

O sistema não dispõe de retorno da informação de deslocamento, e portanto, não estabelece comparação entre os valores dos deslocamentos prescritos com os valores dos deslocamentos efetuados.

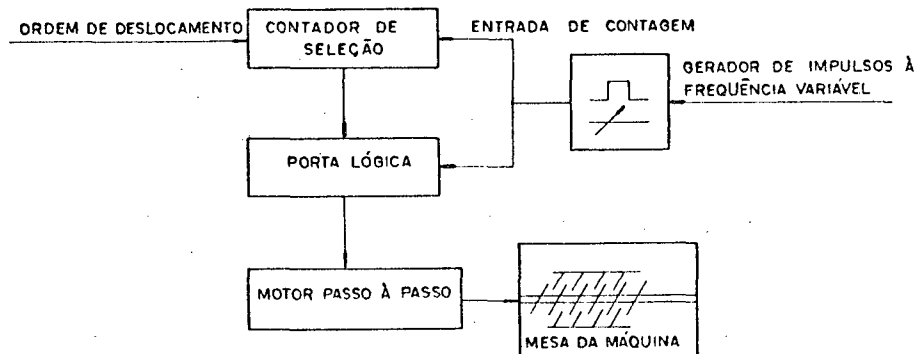


Fig. 1.2.- Sistema de Malha aberta.

- Sistema de Malha Fechada (Contrôlê)

Neste sistema a grandeza de saída (posição atingida) é medida de modo continuado através de um captador e transmitida de volta a entrada para um comparador até que a saída se iguale à grandeza da entrada formando-se um laço fechado.

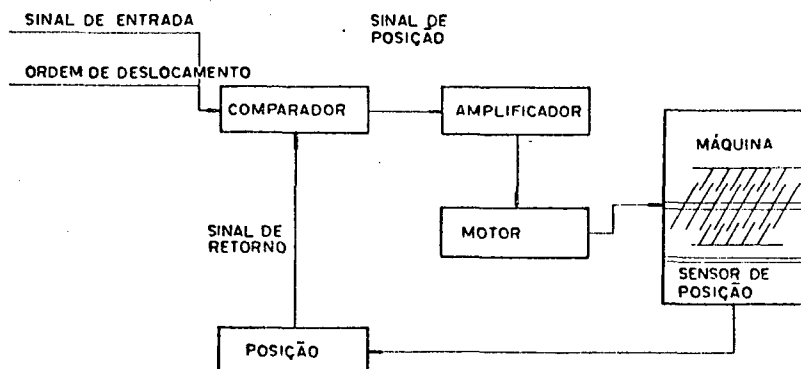


Fig. 1.3.- Sistema de Malha fechada.

1.5-Furação de Placas de Circuito Impresso no Contexto Nacional

A escolha de equipamentos para furação de PCIs resulta da diferença entre as Indústrias Nacionais fabricantes de Circuitos Impressos que, em sua maioria, são formadas por pequenas e médias empresas, em relação às indústrias fabricantes de países do primeiro mundo, tal como nos EUA, formadas em sua maioria, por grandes indústrias.

Segundo fonte da Indústria Lapsen S.A., no Brasil, existem cerca de 100 indústrias que trabalham na fabricação de circuitos impressos. Destas, 10% são indústrias de tamanho considerado grande, 70% podem ser consideradas médias e 20% podem ser consideradas pequenas.

Para as indústrias consideradas grandes, não existem obstáculos para o desenvolvimento de suas linhas de produção de placas, já que no mercado internacional, são encontradas furadeiras de grande porte com sistemas mecânicos bastante sofisticados, com muitos cabeçotes de furação, e que podem executar até 2 furos por segundo em cada cabeçote, furando grupos de até 6 placas.

Estas Indústrias possuem estrutura suficiente para adquirir máquinas como estas, mesmo tendo que importá-las e arcar com os custos relativos a este tipo de compra, tais como manutenção, especialização de funcionários para operá-las, etc.

Ainda segundo esta fonte, as outras, que representam 90% do universo das indústrias fabricantes, não tem condições para adquirir máquinas como estas, já que seu elevado custo não justifica sua aquisição, pois a produção de placas não é suficientemente elevada.

A indústria nacional fabricante de máquinas para furação de PCIs produz máquinas manuais para furação com sistemas ópticos, facilitando o posicionamento das placas, e cabeçotes pneumáticos com furação, quase sempre, de baixo para cima. Estas máquinas manuais tem permitido o desenvolvimento dos setores de furação de placas das indústrias, mas somente até um determinado estágio de produção, existindo uma grande lacuna entre estas máquinas manuais e as máquinas de grande porte acima mencionadas. O mercado necessita de máquinas que possuam o baixo custo de aquisição e a facilidade de manutenção das máquinas manuais, aliadas à rapidez e flexibilidade das máquinas de comando numérico. Fica caracterizada assim a necessidade do desenvolvimento de uma máquina de pequeno/médio porte que possa ser compatível com microcomputadores da linha PC, encontrado na maioria das indústrias, permitindo um incremento substancial na qualidade e produtividade de PCIs. Neste trabalho se apresenta o desenvolvimento de uma máquina ainda sem similar nacional semelhante às que podem ser encontradas em países desenvolvidos.

Este é o resultado de uma etapa intermediária ocorrida há mais tempo no exterior no desenvolvimento das máquinas mais

sofisticadas, não ocorrendo contudo no Brasil, devido entre outras causas a uma distorção oriunda da falta de recursos alocados em pesquisa e desenvolvimento, na década passada.

1.6-Exposição do Trabalho

Segue-se a exposição do trabalho subdividido nos itens abaixo:

1.6.1- Placa de Circuito Impresso

No capítulo 2 faz-se um estudo sobre as placas de circuito impresso, analisando aspectos do seu processo de fabricação, e trazendo dados relativos à utilização de sistemas apoiados por computador, nas fases de projeto, fabricação, e testes enfatizando as características necessárias do equipamento para furação das placas de circuito impresso.

1.6.2- Elementos Mecânicos e Motores

No capítulo 3 realiza-se um estudo sobre os elementos mecânicos e motores utilizados em Máquinas-ferramenta, colocando-se seus conceitos e analisando-se as vantagens e desvantagens dos mesmos no contexto da furadeira de circuitos impressos.

1.6.3- Execução e Montagem dos sistemas Mecânico e Eletrônico utilizados no protótipo de furadeira para placas de Circuito Impresso com Comando Numérico.

No capítulo 4 apresenta-se uma descrição da execução e montagem do projeto mecânico da máquina, mostrando os elementos utilizados. Descreve-se ainda o desenvolvimento da eletrônica, bem como a interligação com o computador e a programação básica utilizada.

1.6.4- Ensaios Estáticos e Dinâmicos

Para analisar o comportamento da máquina operatriz desenvolvida, mostram-se no capítulo 5 os ensaios estáticos e dinâmicos realizados.

1.6.5- Conclusão e sugestões para continuidade.

Avalia-se o projeto e propõe-se novos desenvolvimentos no capítulo 6 .

CAPÍTULO II

PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

2.1- Histórico

Os Circuitos Impressos começaram a ser utilizados juntamente com equipamentos em miniatura, durante a Segunda Guerra Mundial. Isto se deveu à necessidade de diminuição volumétrica de uma grande gama de equipamentos, sendo um dos exemplos o da bomba com espoleta de aproximação, que disparava ao chegar a uma determinada distância do objeto. Por isto foram estimuladas as investigações objetivando a produção de circuitos eletrônicos em grande quantidade /59/.

Os engenheiros da "National Bureau of Standards", e da "Centrolab Division" da "Globe Union Corp." chegaram à montagem de circuitos condutores sobre uma base de cerâmica, e partindo-se deste desenvolvimento militar, se tem alcançado muito progresso na arte do circuito impresso /54/.

Apesar de ser o primeiro desenvolvimento real, deve-se lembrar porém de alguns esforços feitos em países europeus. Em 1942, o Dr. Paul Eisler, que trabalhava na Inglaterra, solicitou a patente que compreendia o emprego de técnicas de impressão e fotografia para a fabricação do circuito impresso /54/.

Uma idéia era a de se empregar tinta resistente à corrosão, que era utilizada para imprimir o circuito desenhado numa chapa de metal muito fina, e que era submergida numa solução corrosiva, atacando as partes da chapa onde não havia pintura. Este trabalho não foi totalmente compreendido pois na década de 40 utilizavam-se válvulas que eram impróprias para Circuito Impresso, só sendo explorado por completo em 1946, pela U. S. Army Signal Corps.

Antes do surgimento do circuito impresso, os componentes eletrônicos eram fixados sobre uma estrutura e a sua interligação era feita através de fiação tradicional. Este tipo de montagem era complexa e demorada, utilizava muito espaço, e era sujeita à erros.

Os circuitos impressos, de uma maneira geral, apresentam as seguintes vantagens sobre a conexão tradicional: reduzem o custo de fabricação ; adaptam-se especialmente à produção em grandes quantidades de um mesmo circuito, mas podem também ser utilizados na produção em pequenas quantidades; economizam espaço e tempo; dão maior uniformidade, melhor reprodutibilidade para um equipamento; são fáceis de trocar.

2.2- Tipos de Placas de Circuito Impresso

Pode-se basicamente classificar as placas de circuito de base rígida em três categorias, segundo o número de camadas condutoras:

2.2.1- Placa de Face Simples:

Quando o circuito condutor está em uma única face ou superfície do material base. São usadas em circuitos simples e/ou onde não haja restrições quanto a espaço físico ocupado pela placa, em geral, para uma densidade de até 150 furos por dm^2 . São as placas de menor custo relativo em função da maior facilidade na fabricação e menor utilização de materiais.

2.2.2- Placa de Dupla Face:

Quando o circuito condutor está nas duas faces ou superfícies do material base. Estes circuitos são hoje em dia interconectados através de furos metalizados (por deposição eletro-química). Os furos têm assim, uma dupla função pois proporcionam a ligação entre as superfícies da placa e a acomodação dos terminais dos componentes. São utilizadas para densidades de 150 à 350 furos por dm^2 e seu custo relativo é médio.

2.2.3- Placa Multicamadas:

Existe nas placas um limitante que vem a ser a redução da largura dos filetes condutores e de suas separações entre si. Há então necessidade de se utilizar a terceira dimensão e neste ponto entram as placas multicamadas. Estas são placas laminadas, consistindo de dois circuitos externos similares às placas de camada simples, acrescido de uma ou mais camadas condutoras, situadas internamente às duas placas externas. Estas camadas são conectadas às outras camadas através da furação metalizada.

Placas deste tipo são utilizadas onde o sistema requer um grande número de interconexões em um espaço relativamente pequeno, e para densidade de furos acima de 350/ dm^2 .

Uma aplicação para este tipo de placa é a interconexão de outros módulos ou placas de circuitos, comumente chamada de placa-mãe. Neste tipo de aplicação a placa de multicamadas serve como uma interconexão muito eficiente, já que a mesma possui baixo peso e ocupa pouco espaço, quando comparada a placas de simples e duplas camadas que

executam a mesma função, enquanto fornece suporte mecânico para o chassi.

Estas placas trazem as vantagens básicas dos outros tipos e estão aumentando sua utilização principalmente em PCIs, com alta densidade de componentes.

Os materiais-base das PCIs de multicamadas serão, preferencialmente, as fibras de vidro com resina epoxi. O uso destes tipos de fibra com resina como material base assegurará à placa de circuito alta estabilidade e mínimo empenamento. As camadas devem ter uma espessura de cobre depositada por processo de eletrodeposição e posteriormente são unidas através de pressão e calor. São as placas de maior custo relativo.

A relação de custo entre os tipos de circuito impresso depende da quantidade de placas a ser fabricada, que amortiza os custos das ferramentas. De maneira geral podemos levar em consideração que: a placa de face simples, rígida, fenolite, com furos estampados, possui custo relativo = 1; a placa de face dupla, rígida, fibra de vidro, furação utilizando broca, furos metalizados, custo relativo = 7 e a placa de multicamadas, com 5 camadas, rígida, fibra de vidro, furos metalizados, custo relativo = 40 /3/.

Com estes dados se tem a noção de custo relativo entre os tipos de placas. Logicamente, a escolha de um determinado tipo não implica numa simples análise de custos, mas é certo que esta análise terá um peso considerável na escolha.

2.3- Material para Placas de Circuito Impresso

O material base para PCIs é o laminado que se constitui de um material isolante (dielétrico) e lâminas de material condutor /21//3/.

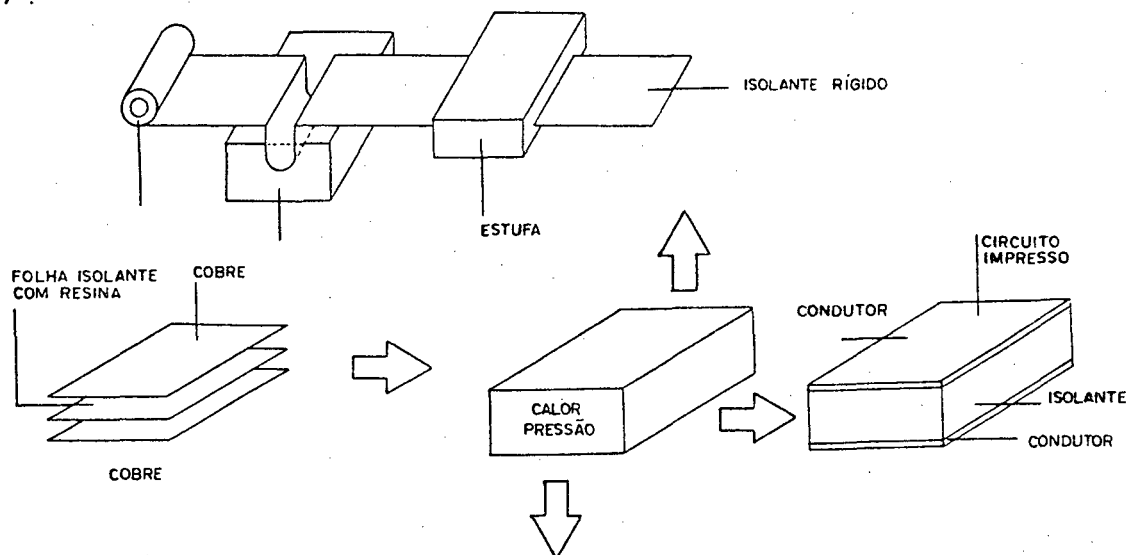


Fig. 2.1.- Construção esquemática dos laminados.

2.3.1- Material Condutor

Deve-se utilizar como elemento condutor, preferencialmente o cobre. A única característica variável na lâmina de cobre é a espessura que limita a largura da pista condutora em função da condutibilidade mínima do cobre que é relacionada à área da secção transversal da pista /3/.

A tabela 2.1 abaixo apresenta esta relação :

espessura(SI)	espessura(unidade Inglesa)	largura mín. da pista condutora mm
18 microns	1/2 onça/pé quadrado	0,2mm
35 microns	1 onça/pé quadrado	0,3mm
70 microns	2 onça/pé quadrado	0,5mm

Tab.2.1-Espessura da lâmina de cobre x largura mín. da pista condutora

2.3.2- Material Isolante

Como material isolante utilizam-se os laminados. Por definição, um laminado consiste de materiais fibrosos aglutinados sob calor e pressão, juntamente com uma resina. Na indústria de circuito impresso este será um material à base de papel impregnado de resina fenólica ou epoxy, ou uma tela contínua de fibra de vidro impregnada com resina epoxy.

A seguir, dá-se uma descrição dos materiais usados para fabricar cerca de 95% das placas de circuito impresso. A designação foi estabelecida pela Associação Nacional de Fabricantes Elétricos dos Estados Unidos da América do Norte /21/.

1.- XXXPC.- Este material é feito para um alto grau de qualidade e vem a ser um produto com base em papel impregnado com uma resina fenólica que serve para depósito de várias camadas de material, posteriormente. Muitos dos circuitos impressos encontrados em rádio, televisão, máquinas de escrever, etc, são deste tipo.

2.- FR 2.- As letras FR aparecem para designar um material resistente a chama (Fire Resistant). Isto significa que se a peça for inflamada, ela se apagará tão logo seja removida da chama do queimador. O grau FR 2 é muito similar ao grau XXXPC exceto por esta propriedade de auto-extinção de chama. Ele é usado em

aplicações onde há perigo de fogo ou onde as condições de segurança dos laboratórios não permitam o uso de componentes inflamáveis.

3.- FR 3.- Esse tipo de laminado, com base em papel e resina epoxy, possui a propriedade de auto-extinção de chama e foi desenvolvido originalmente para a indústria de computadores.

4.- G 10.- Este é um laminado de alta qualidade com boas propriedades mecânicas e elétricas, grandemente utilizado em equipamentos militares e em muitos computadores. Ele é feito com mantas de fibra de vidro e recoberto com resina epoxy.

5.- FR 4.- As propriedades desse laminado são muito semelhantes às do tipo G10, exceto por possuir a propriedade de auto-extinção de chama, que já foi discutida no tipo FR 2.

6.- G 11.- Este vem a ser outro laminado com base em manta de fibra de vidro, recoberta com resina epoxy, e foi desenvolvido porque o laminado G 10 nem sempre mantém suas propriedades, principalmente quando submetido à altas temperaturas. Por exemplo, o laminado G 10, quando testado a 150 graus centígrados, tem menos de 10% da resistência mecânica e elétrica do que a que possui quando à temperatura ambiente.

Em contraste, o laminado G 11 utiliza um catalizador que conserva a resistência à flexão, sob temperaturas elevadas.

Em testes também a 150 graus centígrados foi atingida uma resistência à flexão, com o tipo G 11, igual a 50% do valor à temperatura ambiente. Da mesma forma, as propriedades elétricas se mantêm na mesma proporção de variação das propriedades mecânicas, com o aumento da temperatura.

7.- FR 5.- É a modificação do laminado G11 que possui a propriedade de auto-extinção de chama.

2.3.3- Dimensões normalizadas dos laminados.

As dimensões normalizadas para espessura da placa de circuito impresso de face simples e dupla face incluindo material condutor são: 0,8mm, 1,0mm, 1,2mm, 1,6mm, 2,0mm, 2,4mm, 3,2mm.

No mercado brasileiro o laminado de espessura 1,6mm é facilmente encontrado por ser largamente utilizado. As outras dimensões estão sujeitas a consulta prévia ao fornecedor.

A espessura das placas multicamadas depende do número de camadas das mesmas.

2.4- Concepção de uma Placa de Circuito Impresso

Uma placa passa por uma série de etapas durante o processo de geração, desde a concepção da mesma até a fase final de montagem dos componentes. Basicamente, a concepção terá duas fases que serão as de projeto e de fabricação /51/.

2.4.1- Fases de Projeto

Esta fase é dividida em três etapas, que são o Esquema Elétrico, o Lay-Out, e a Arte Final.

2.4.1.1- Esquema Elétrico:

O esquema elétrico consiste de símbolos que representam os componentes eletrônicos e elétricos e linhas que representam as uniões entre os componentes, de maneira que a placa execute as funções a que se destina.

2.4.1.2- Lay-Out:

O esquema elétrico é posicionado em um reticulado em escala ampliada. As dimensões mecânicas, como dimensões externas, pontos de fixação da placa, etc, são estabelecidas. Os componentes são mecanicamente projetados e posicionados na placa seguindo um padrão com 2.54 mm de distância entre malhas, que contém o espaçamento mínimo entre filetes, componentes e furação. As pistas condutoras são dimensionadas segundo suas características elétricas, sendo então traçadas. O Lay-Out é o documento de ligação entre o Esquema Elétrico e a Arte Final e é geralmente executado em escala de Ampliação de 2/1.

2.4.1.3- Arte-Final:

É a configuração exata, em escala ampliada, do traçado condutor da placa de circuito impresso, cada um representando uma face da placa. A arte-final é o último documento gerado na fase de projeto. A arte principal geralmente é feita em uma escala de ampliação (2/1 ou 4/1). A partir dessa etapa a placa entra no processo de fabricação. Todas estas três fases podem ser executadas utilizando-se um método manual ou um método automático, tal como o Computer Aided Design (CAD).

2.4.2- Fases de Fabricação

2.4.2.1- Fotolitos de Produção:

Fotolito é a configuração exata, em escala 1:1 de cada um dos documentos que contém as imagens que serão transferidas para a placa. Estes documentos são:

- Fotolitos dos traçados dos condutores;
- Fotolitos de máscara de solda;
- Fotolitos de simbologia (serigrafia).

O Fotolito de Produção de Imagem Múltipla surge a partir do fotolito original de produção, e de acordo com o processo de produção empregado, pode-se gerar um fotolito de produção de imagem simples, que contém a imagem de uma única placa, ou um fotolito de produção de imagem múltipla, contendo também a imagem de várias unidades de uma mesma placa, geralmente de pequenas dimensões. A partir da transferência da imagem dos fotolitos de produção para os laminados, obtem-se os painéis de onde serão produzidas as placas impressas.

2.4.2.2- Fabricação:

A fabricação de placas de circuito impresso pode ser resumida em cinco fases principais:

-Furação: pode ser manual, com auxílio de equipamentos ópticos, ou comandada por computador, que evidentemente, proporciona maior confiabilidade. O tamanho do furo deverá seguir uma regra básica. No mínimo ele deverá ser de 0,15 mm maior que o diâmetro máximo do terminal do componente, e no máximo deverá ser de 0,50 mm maior que o diâmetro máximo do terminal. Já o tamanho da ilha deverá ser um

círculo de no mínimo 0,50 mm maior do que o raio máximo do furo. Além disto, a distância máxima de furação entre furos para fixar um componente vem a ser a distância entre os terminais de um componente acrescido de no mínimo 1,52 mm para cada lado.

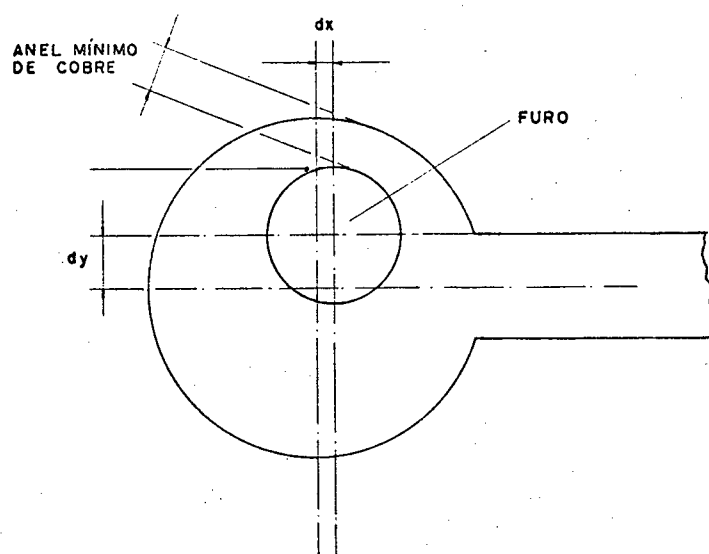


Fig. 2.2.- Descentralização do furo em uma ilha.

-Imagem: a imagem do traçado condutor presente no fotolito é transferida para a placa.

-Metalização: o traçado condutor e o interior dos furos, são submetidos à deposição de cobre dos processos químicos e eletroquímicos.

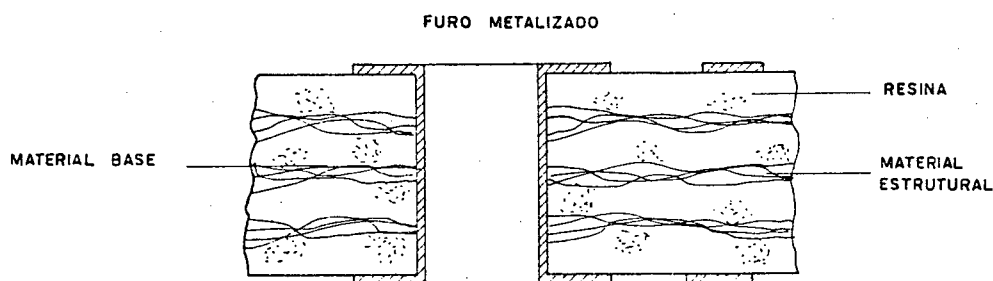


Fig. 2.3.- Furo metalizado.

-Corrosão: o cobre não utilizado na placa é removido, restando apenas o traçado condutor.

-Acabamento: Finalmente são executados a furação dos pilotos, o polimento e a aplicação da máscara de solda sobre a placa.

2.4.2.3- Placa Impressa Montada:

É a placa no seu estágio final, com todos seus componentes montados e soldados, e pronta para ser inserida no equipamento a que se destina. É utilizado como guia uma lista de componentes eletrônicos e elétricos, montados segundo suas características e localização na placa.

2.5- Processos de Impressão da Imagem Condutora

Para impressão da imagem condutora existem dois processos bastante distintos: o processo positivo onde o material que não está no desenho do circuito é removido por corrosão, e o processo negativo onde o circuito é fabricado por adição de material através da galvanização. Geralmente utiliza-se um processo misto. Dentro do processo, tanto positivo quanto negativo, vamos encontrar duas divisões:

2.5.1- Impressão Serigráfica

É o processo de transferência de uma imagem sobre uma superfície através de pressão adequada, com um rôdo sobre uma matriz de tela serigráfica que contém o negativo da imagem. Vem a ser um método de impressão simples, de custo relativamente baixo e utilizado em grandes produções. No processo positivo, o circuito é estampado sobre a placa na sua forma definitiva com uma tinta resistente à corrosão. Depois o cobre, que não está protegido pela tinta é removido, e por último, a tinta é retirada revelando o circuito definitivo. No processo negativo, somente o local onde ficará o circuito não recebe a impressão. A resolução depende basicamente da malha da tela utilizada e observa-se que trilhas abaixo de 0,3mm de largura dificilmente serão executadas com precisão.

Este por sua vez recebe galvanização metálica e, depois da galvanização, uma tinta à base de zinco resistente ao processo corrosivo. Quando a tinta é finalmente retirada, o circuito, depois de corroído, estará pronto.

2.5.2- Impressão Fotográfica

No processo de Impressão Fotográfica a placa é cortada, depois limpa e desengordurada. Posteriormente é aplicada uma camada muito uniforme de substância foto-sensível (resistente) sobre a

mesma, sendo secada em uma estufa. Com isto é formada uma película sobre a placa. É colocado então o fotolito sobre a película e submetido à luz ultravioleta por aproximadamente 15 minutos. Um revelador retira a substância não sensibilizada e a placa é então lavada. Pode-se utilizar também uma substância conhecida como revelador de folhas, que marcará todos os pontos sensibilizados da placa, tornando-os escuros. Este processo de produção é mais caro que o anterior, mas é mais preciso, em que se consegue melhor definição do desenho.

Pode-se, também aqui, utilizar os processos positivo e negativo, como no caso anterior.

2.6- Processos de Produção de Placas de Circuito Impresso

Os processos mais comuns de produção de placas de circuito impresso são o substrativo, o semi-aditivo e o de adição total. Basicamente, os processos dependerão do tipo de impressão da imagem condutora com o qual se trabalha, e da necessidade de se uniformizar a espessura da camada de cobre da placa. Explica-se a seguir cada um dos três métodos.

2.6.1- Processo Substrativo

No processo substrativo comum parte-se do laminado e executa-se um corte na chapa, deixando-a com as dimensões projetadas.

É feita posteriormente a furação por estampagem ou com brocas, utilizando-se uma máscara de furação. Em seguida é feita uma limpeza na placa para retirar rebarbas e desengordurar a mesma. É impressa então a Imagem condutora fotograficamente ou serigráficamente. O processo sendo o positivo requer fotolito negativo. É feita a corrosão e remove-se a máscara, deixando-se a placa pronta. Este processo é o mais simples e é utilizado quando não se necessita de muita precisão na espessura dos filetes.

2.6.2- Processo de Semi-Adição

Neste processo é utilizado um laminado normal e a chapa é cortada segundo dimensões pré-estabelecidas. Depois disto é feita a furação utilizando-se brocas ou por processo de estampagem.

É feita uma limpeza para retirar gorduras e rebarbas da chapa. Posteriormente é feita uma retirada química de material condutor no sentido de desoxidá-lo, e a placa recebe em toda sua extensão um reforço no revestimento de cobre. Este reforço terá a espessura de 3.0 à 5.0 micrometros. É impressa a imagem

fotograficamente ou serigráficamente por processo negativo de impressão, descrito anteriormente. O fotolito usado será o positivo. Depois disto a imagem é reforçada galvanicamente até atingir a espessura desejada. Em seguida a imagem condutora recebe uma tinta à base de zinco, que é resistente à corrosão, e então a placa é corroida e com isto é retirada a fina lâmina de cobre dos pontos indesejados. É então removida a mascara de proteção, estando concluído o processo.

2.6.3- Processo de Adição Total

O processo de adição total é bastante semelhante ao anterior, sendo utilizado quando se necessita um controle bastante acurado da espessura da lamina condutora. A diferença entre este processo e o anterior reside no fato de que a adição de material condutor neste processo é integral sobre o material base. O processo de impressão da imagem condutora, como no caso anterior, é o processo negativo que utiliza o fotolito do tipo positivo. Pode-se utilizar o laminado normal neste processo, mas a lamina condutora deverá ser totalmente retirada através de um processo químico.

2.6.4- Comparação entre os processos

No Brasil os dois processos mais utilizados são o processo substrativo, quando se requer simplicidade na fabricação, e o processo de semi-adição, quando se requer precisão e metalização das furações. O processo de adição total quase não é utilizado, apesar da elevada precisão na espessura das pistas condutoras que é obtida, pois o custo de produção da chapa é elevado.

2.7- Usinabilidade Relativa dos Materiais

A fabricação de placas de circuito impresso, através da utilização de laminados recobertos com cobre, envolve um certo grau de violação do material base. Muita atenção deve ser dada aos vários passos do processo, que pode macular o material base, devendo se diferenciar entre uma operação, vantajosa ou não.

De maneira geral, os materiais que têm base de papel, XXPC FR 2 e FR 3 são facilmente usináveis. Já os laminados com base em fibra de vidro são mais difíceis de serem usinados, mas são muito resistentes aos choques e exposições químicas.

Nos materiais com base em papel, a usinagem das furações pode ser feita através do puncionamento, como já foi especificado. Para os materiais com base em fibra são usadas furadeiras com brocas. A seguir serão discutidos alguns aspectos relativos aos dois tipos de usinagem:

2.7.1- Furação utilizando punção

As placas de circuito impresso de face simples fabricadas com materiais que tem como base o papel, são geralmente furadas utilizando-se o processo de puncionamento. Este processo é bastante semelhante ao utilizado quando se trabalha com metais, ou seja, trabalha-se com um punção que executa o corte, e uma matriz. É preciso lembrar também que os materiais com base em papel sofrem deformações depois de usinados. No caso da estampagem de furos, os mesmos sofrerão uma contração em seus diâmetros logo após terem sido confeccionados. Por isto deve haver uma compensação entre o tamanho do furo desejado e o diâmetro do punção que executará este furo. Da mesma forma que haverá uma diferença entre o punção e a matriz, colocada abaixo do laminado para permitir o corte. Esta diferença depende da espessura dos laminados utilizados.

A tabela 2.2 abaixo traz o aumento que deve ser dado ao punção em relação ao furo desejado. No caso da matriz o diâmetro do furo deverá ser de 0.05 à 0.10 mm maior que o diâmetro do punção /21/.

espessura do laminado (mm)	Aumento do diâmetro do punção em relação ao diâmetro do furo
0.4	0.025 à 0.050
0.8	0.050 à 0.076
1.2	0.076 à 0.101
1.6	0.101 à 0.127
2.0	0.127 à 0.178
2.4	0.152 à 0.203
2.8	0.228 à 0.279
3.2	0.254 à 0.305

Tab.2.2- espessura do laminado x aumento do diâmetro do punção

2.7.2- Furação utilizando brocas

O processo de usinagem das placas com base em fibra de vidro onde se deseja a metalização interna dos furos é feita através da utilização de brocas dependendo da máquina e da ferramenta utilizada.

A broca é a ferramenta de corte, usualmente cilíndrica helicoidal, usada para furar metal ou outro material qualquer, podendo ser trabalhada manualmente ou acionada por meio de máquina. Fabricantes de circuito impresso controlam a qualidade dos furos e a produtividade mediante apropriada seleção de máquinas de furação, velocidades corretas, alimentações de entrada e saída dos materiais e das

ferramentas de furação.

As brocas utilizadas na furação são produtos precisos, projetados e executados com padrões normalizados. O fabricante de brocas deve selecionar o material certo, desenvolver métodos para manter tolerâncias estreitas, gerar superfícies polidas e escolher a melhor combinação dos detalhes geométricos, com sentido de dar ao usuário um ótimo desempenho da ferramenta, em grande variedade de aplicações. Muitos parâmetros afetam o desempenho da broca: o ângulo de hélice, a geometria da ponta (ângulo da ponta, ângulo de alívio primário e secundário) e espessura do recobrimento. Estes são os mais importantes. Dentro de limites razoáveis um grande ângulo de hélice facilita a remoção de cavacos do furo, e a maior parte do cavaco carrega o calor gerado na furação. Por isto um ângulo de hélice elevado é benéfico /47/.

Entretanto, um ângulo de hélice muito grande enfraquecerá o canto de corte. Muitos fabricantes produzem brocas com uma hélice de 35 graus, e algumas oferecem também brocas com hélices de 25 graus. Os menores ângulos promovem a formação de cavaco sobre a placa de material, que é resistente a esta formação com utilização de ângulos maiores. O ângulo da ponta típica de brocas para furação de PCIs é de 130 graus. Com brocas de diâmetros maiores que 3.0 mm o ângulo será de 165 graus. O ângulo de folga primário está na faixa de 12 à 15 graus, com alguns fabricantes utilizando de 5 à 6 graus para tamanhos maiores. O ângulo de folga secundário é geralmente de 30 graus para todos os tamanhos. A espessura do recobrimento varia sobre uma grande faixa, usualmente de 12 à 24 por cento do diâmetro. A deflexão da broca é maior com um recobrimento fino, e então os grandes recobrimentos são diminuídos para, parcialmente, compensar este efeito.

As superfícies das brocas que requerem bom grau de acabamento são as pontas, as margens e as folgas (para reduzir a propensão dos cavacos aderirem). Já a seleção do material das ferramentas é a característica mais importante. Infortunadamente, para o usuário das brocas, o material é o item mais difícil para analisar a confiabilidade de uma broca. Testes extensivos têm mostrado que graus idênticos de carbonetos de produtores diferentes devem ter as mesmas propriedades quando medidos nos laboratórios metalúrgicos, mas deverão comportar-se diferentemente quanto ao desempenho da broca avaliada, usando os mesmos critérios: quantidade de furos e vida da ferramenta. Até recentemente todas as brocas eram feitas de uma gama de materiais chamados de carbonetos C2. Este material, que é usado para brocas maiores que 1/8 de polegada de diâmetro, contém 6 por cento de cobalto como ligante, além de carbonetos de tungstênio /45//46/. Em muitas aplicações o carboneto C2 rende uma vida de 1000 à 2000 furos antes de haver uma reafiação da broca.

As ferramentas mais atuais e comuns são feitas com um

recobrimento mais resistente que possui cobalto em porcentagens de 6 por cento, além do carboneto de tungstênio em grãos menores de que 1 μm , que são chamados de microgrãos. O grau de microgrãos permite um aumento na vida da ferramenta 5 à 10 vezes maior que a atingida com material C2. Não somente a vida é aumentada, mas os grãos menores permitem aos fabricantes de brocas criarem formas de corte e gumes que permanecem através da vida da ferramenta. O resultado é um aumento na qualidade dos furos, e também ganhos no reapontamento das brocas. O desgaste das brocas não é um problema nos furos de pequeno diâmetro. O modo usual de falha das brocas de pequenos diâmetros é a quebra, e isto pode ser evitado por uma apropriada seleção do material da broca.

Deve-se também tomar cuidado especial para manuseio de brocas de pequeno diâmetro, já que estas são de fabricação e afiação mais difícil, além de um cuidado extremo na colocação do anel que limita o comprimento máximo da ferramenta. A furação é pois dependente da preparação da máquina, da verificação das variáveis do processo, da inspeção e da colocação correta da broca.

As furadeiras utilizadas podem ser manuais e automáticas. Nas máquinas manuais, utilizou-se no início do processo de fabricação basicamente a experiência de operadores neste tipo de usinagem. Com o aumento do grau de precisão das furações, maior qualidade das mesmas foi obtida naquelas máquinas, utilizando-se gabaritos de furação e, posteriormente, cabeçotes com auxílio óptico, que atualmente consistem em câmeras de televisão que ampliam a área de furação, facilitando a centralização manual. Com a utilização do comando numérico aplicado à estas máquinas, já se consegue uma precisão necessária na fabricação da placa de circuito impresso, que é o fator determinante no sucesso da montagem de componentes, principalmente nas montagens automáticas. A localização do furo deverá ter uma tolerância variando de $\pm 0.025\text{mm}$ à $\pm 0.050\text{mm}$. Segundo a tabela 2.3 abaixo esta precisão só é alcançada utilizando-se máquinas de furação com Comando Numérico /21/.

Métodos de Furação	Tolerância (mm)
Visão simples	$\pm 0.2 \text{ mm}$
Gabarito de furação	$\pm 0.1 \text{ mm}$
Auxílio óptico	$\pm 0.1 \text{ mm}$
Furadeira com Comando Numérico	$\pm 0.025 \text{ à } 0.050 \text{ mm}$

Tab.2.3- Método de furação x tolerância

2.8- Metalização das Furações

A metalização dos furos é um processo bastante utilizado em placas com mais de uma face condutora. O processo serve para fazer o contato elétrico entre duas ou mais faces, e melhorar as características de ligação elétrica e soldabilidade entre os componentes e a placa de circuito. O processo é iniciado com a furação da placa de circuito, utilizando broca. Depois disto é feita uma limpeza para a retirada de gorduras e de rebarbas da superfície interna do furo. Quando o processo de limpeza se encerra, é feita uma deposição de cobre internamente ao furo. Posteriormente é feita a impressão do circuito por um dos processos existentes. Depois de completada a impressão, o furo e as superfícies que não receberam a tinta de impressão são metalizados, tomando-se o cuidado de reforçar as superfícies ao redor dos furos. É aplicada uma tinta ou camada de metal sobre as camadas de cobre galvanizada. Esta tinta deverá ser preferencialmente à base de Zinco ou Chumbo que são metais anti-corrosíveis. Finalmente, é removida a máscara, e o circuito é corroído onde não está protegido pela camada metálica anti-corrosão. Os furos através das placas de circuito devem ser suficientemente grandes para permitir o depósito de metal sobre as paredes. Geralmente o diâmetro mínimo dos furos deve ser de $3/4$ da espessura da placa depois da eletrodeposição. Isto permitirá a deposição de aproximadamente 12,5 à 50 μm de metal, por todo o furo. O depósito de metal sobre a superfície deverá ser maior que o dobro da espessura de metal depositado no furo /3//21/.

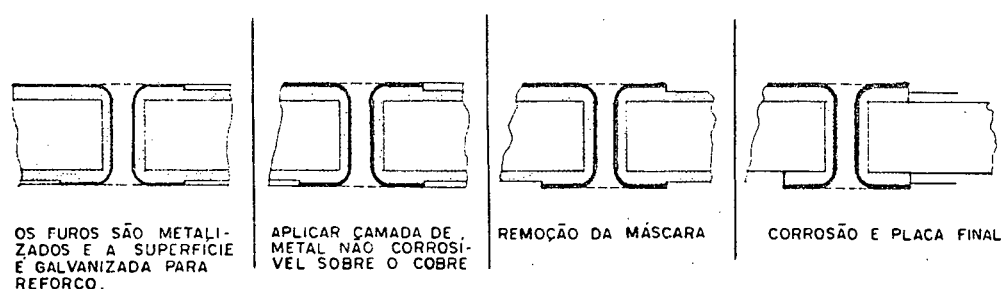


Fig. 2.4.- Processo de metalização das furações.

2.9- Características necessárias nas Máquinas de furação com brocas para Placas de Circuito Impresso

Nas placas, por sua vez, têm sido aumentada em muito a densidade de componentes montados por área de placa e, nos últimos anos, este aumento tem sido vertiginoso. Existe um aumento na fabricação de furação de pequeno diâmetro e profunda. Um furo profundo para circuito impresso seria um furo que tivesse a profundidade maior do que 5 vezes o diâmetro.

A dificuldade de se produzir um furo considerado profundo, é decorrência não tanto do diâmetro da broca, propriamente dita, mas sim pelo aspecto interno do furo, que é algo bastante difícil de ser controlado. Disto tem resultado muitos problemas para a fabricação de placas de circuito impresso:

- Desenvolvimento de processos de controle para evitar quebra da broca durante a usinagem e manuseio das mesmas;
- Compensação para baixa produtividade decorrente da diminuição da velocidade de posicionamento e das pequenas pilhas de placas possíveis de serem usinadas;
- Alta taxa de cavacos formados que resultam em aumento de quebra das brocas durante a furação;
- Aumento dos custos da ferramenta para poucas furações com uma broca;
- Altas variáveis de processo para brocas de pequeno diâmetro;
- Menor chance de reafiação das brocas.

A furação de placas de circuito impresso, mesmo aqueles furos de diâmetros pequenos, podem ser executados utilizando-se para tanto equipamento convencional e brocas disponíveis no mercado, o que contudo ocasionará queda do rendimento da máquina e confiabilidade baixa.

Portanto, são feitas a seguir algumas abordagens no sentido de melhoria no projeto da máquina, operação, manutenção e seleção da ferramenta. Engenheiros, envolvidos com o processo de furação de placas de circuito impresso, determinaram que existem 2 fatores básicos para a execução do processo de furação com sucesso, que são preparação da máquina e variáveis de processo /73/.

2.9.1-Preparação da Máquina de Furação

Para a furação de placas de circuito impresso, com sucesso, é necessário que a máquina esteja com suas mecânicas X,Y e Z totalmente alinhados e estáveis, uns em relação aos outros.

Para tanto, a desmontagem da mesa e checagem de seus eixos, deve ser entendida como um bom processo de manutenção que dará garantia de estabilidade e alinhamento da mesa.

Junto ao ajuste da estabilidade da máquina, devem ser

observados as seguintes 5 componentes de furação, que são consideradas críticas:

-A primeira componente vem a ser o cabeçote de furação. O mandril ou pinça do cabeçote de furação acaba por se desgastar, causando a rotação excêntrica da broca, o que ocasiona uma furação imprecisa além do perigo de quebra da broca. Para inspecionar a folga da pinça, pode-se usar um indicador preciso, que deverá ser colocado a uma distância de 19,00 milímetros do início da broca. A excentricidade medida para uma rotação baixa da furadeira jamais poderá ser maior do que 0,005 milímetros. Caso seja detectado um valor maior do que este, deve-se procurar reduzir o comprimento de furação da broca, modificando-se a altura do anel limite que deve ser de $20,3 \pm 0,5$ mm /21//33//73/.

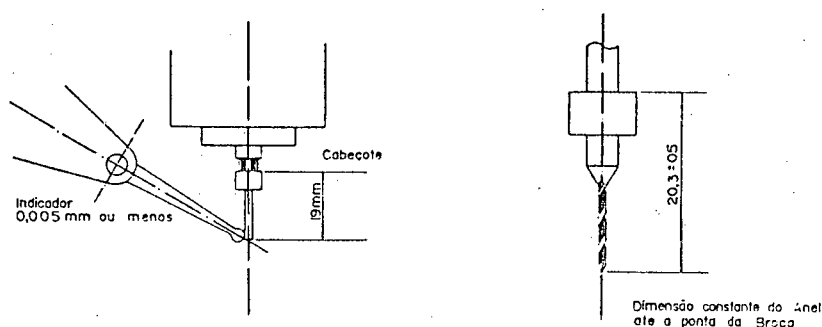


Fig. 2.5.- Medição da excentricidade do cabeçote e comprimento da broca com anel.

-A segunda componente é a pressão do cabeçote sobre a placa, que deve ser providenciada por um suporte colocado ao redor da broca. Isto previne a flexão da placa, que acarretaria o toque do material na broca, antes do início do processo de furação. Esta pressão não deve ser maior do que 30 libras de pressão, para máquinas que possuem um sistema de ar comprimido. A diferença entre a ponta da broca e o final do anel que fará a pressão, deverá ser de aproximadamente 1,5 milímetros, o que permitirá a descida da broca sem perigo de choque com a placa /21//33/.

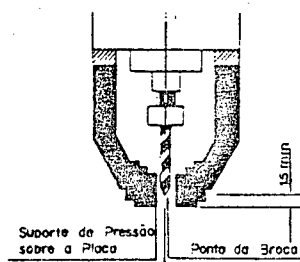


Fig. 2.6.- Distância da ponta da broca ao suporte.

-O movimento principal da mecânica Z, que vem a ser a terceira componente, pode contribuir para a quebra da broca quando a mecânica Z reverte seu sentido de movimento e começa a retirar a broca do furo. Durante as operações normais, a mecânica Z executa milhões de ciclos de furação à alta velocidade, e pequenos desvios desta são aceitáveis. Qualquer folga verificada deve ser também medida como no caso do cabeçote e deve ser corrigida quando for maior do que 0,10 milímetro.

-Como quarta componente, a furadeira para placas de circuito impresso deve utilizar um sistema de aspiração (ou de vácuo), mesmo que a movimentação do seu cabeçote de furação não seja feita por ar comprimido. O vácuo é utilizado para a limpeza da superfície da placa, ao mesmo tempo que o ar refrigera a broca. Uma baixa pressão do vácuo pode resultar em cavacos e poeira assentados sobre o material, o que acarretará uma maior probabilidade de quebra da broca. O vácuo deverá ser de pelo menos 200 l/min /21//33/.

-Finalmente, como quinta componente, a mesa de trabalho deverá ser perfeitamente plana. Durante a usinagem, recortes e abrasão podem resultar que o material a ser furado empene ou falhe. Placas de circuito impresso devem ser fixadas corretamente para prevenir movimentos laterais, ou subida do material, quando a pressão exercida pelo cabeçote começa o ciclo de compressão.

2.9.2- Variáveis de processo

O segundo fator importante para uma furação bem sucedida, é o levantamento de todas as variáveis de processo. Para usinagem de qualquer furo existem certas variáveis de processo, que podem ser controladas pelo usuário. Estas variáveis são ligeiramente modificadas quando a usinagem é de furos de pequeno diâmetro.

A primeira variável é a fixação das placas de circuito impresso à mesa da máquina, que requer um cuidado bastante grande, já que o cabeçote e a placa se deformam durante a furação.

Foram identificados 4 métodos de fixação de placas de circuito impresso. Os métodos estão listados segundo ordem de preferência:

1. O primeiro método de fixação de placas é o de ter furos colocados sobre a linha de centro da mesa da máquina e, internamente a estes, insertos macios de borracha, nylon ou

teflon. Sobre a placa de circuito impresso são fixados pinos de aço rígido que serão pressionados através dos insertos macios. Este método de fixação é largamente empregado, garantindo uma grande precisão na confecção dos furos sobre a placa, mas traz o inconveniente do desgaste mais rápido dos insertos colocados sobre a mesa da máquina, que deverão ser trocados frequentemente.

2. O segundo método, é o de colocar tampões de inserto macio sobre a mesa em furos executados sobre a linha de centro. Internamente a estes tampões, serão colocados pinos de aço com uma fixação, nos quais serão fixadas as placas de Circuito Impresso. Este método, além de preciso, praticamente não sofre desgaste na utilização.

3. O terceiro método é o de ter buchas de aço na linha de centro fixadas, ou com indicações que permitam guiar a broca. O alinhamento neste tipo de sistema deve ser checado regularmente.

4. O último método é o de ter buchas de aço na borda da mesa junto ao prato das ferramentas. O método permite uma montagem rápida das placas sobre a mesa, mas ao mesmo tempo acentua erros e requer realinhamento frequente não sendo por isto muito recomendado.

Na realidade o método selecionado não é de grande importância na furação. O importante é que o operador da máquina verifique se não existe material estranho entre as placas a serem furadas.

A placa de circuito impresso de entrada, que é outra variável do processo, é uma necessidade na furação de PCIs com precisão. Esta primeira placa estabiliza a entrada da broca antes da furação da primeira camada de cobre a ser executada. Existe um acréscimo gradual na carga axial sobre a ferramenta, antes de entrar sobre a camada de cobre.

Já quando há necessidade de execução de furos de pequeno diâmetro devemos considerar principalmente três aspectos do processo que são: o número de rotações por minuto, o avanço e a taxa de retração do cabeçote.

Para diâmetros menores do que 0,5 milímetros, deve-se usar a maior rotação possível. De uma maneira geral seguimos a tabela 2.4 seguinte /33/:

VELOCIDADE DO CABEÇOTE	TIPO DE OPERAÇÃO
7.500 à 15.000 RPM	FRESAGEM
15.000 à 40.000 RPM	FRESAGEM / FURAÇÃO
40.000 à 60.000 RPM	FURAÇÃO / FRESAGEM
60.000 à 80.000 RPM	FURAÇÃO
100.000 RPM	FURAÇÃO DE DIÂMETROS ABAIXO DE 0,25mm

Tab. 2.4- Velocidade de rotação do cabeçote x tipo de operação

As ferramentas utilizadas na fabricação de placas de circuito impresso precisam manter o valor do avanço relativamente baixos, para evitar quebras, já que as ferramentas são submetidas a grandes esforços /73/.

Segue-se a tabela 2.5 abaixo:

Diâmetro da broca	Taxa máxima de avanço (mm/min)
0,50 mm	3048 à 4064
0,330 mm	2032 à 3048
0,254 mm	1524 à 2540
0,101 mm	762 à 1524

Tab. 2.5- Diâmetro da broca x Taxa de avanço

Já a velocidade de retração das brocas deve ser bem controlada, pois a força de tração destas brocas é tão crítica quanto a força de compressão. É importante lembrar que a maior parte de quebra de brocas ocorre quando da reversão da mecânica Z.

A velocidade de retração na maioria das máquinas é de 40 mm/seg, podendo chegar em algumas máquinas até a 400 mm/seg.

2.10- Utilização de Componentes Montados sobre as Superfícies (SMDs) e Chip-on-board

Com a miniaturização dos equipamentos eletrônicos, os custos de fabricação ficam cada vez maiores, gerando uma busca por redução dos mesmos, ao mesmo tempo que um aumento na qualidade dos produtos. Isto acabou levando ao desenvolvimento de um tipo de componente miniaturizado, que pode ser montado sobre as superfícies das placas, sem a necessidade de furação. Estes componentes já foram projetados para que fossem manejados por máquinas de colocação e soldagem automáticas com qualquer das modernas técnicas utilizadas. São conhecidos como SMDs ou componentes montados em superfície (Surface Mounted Devices).

A colocação deste tipo de componente é direta e rápida e oferece algumas vantagens: tamanho reduzido do equipamento final; menor custo de montagem; maior confiabilidade, tanto dos componentes quanto do equipamento e melhor desempenho em alta frequência.

O processo de montagem de uma placa com componentes SMD e componentes convencionais segue o fluxo abaixo:

- 1- Controle de qualidade da placa - Checar todas as suas características antes da montagem dos componentes;
- 2- Impressão da pasta de solda - Aplicada por processo serigráfico nos pontos onde serão montados somente os SMDs;
- 3- Montagem dos SMDs - Pode ser feita manual ou por meio de máquinas robotizadas que garantem grande produção e precisão de montagem;
- 4- Soldagem dos SMDs - Utilizando maquinário apropriado para esta finalidade, de maneira a soldar os SMDs sem contacto mecânico, que os faria deslocar;
- 5- Controle de qualidade - Devido o componente ser pequeno e com grande quantidade de terminais, a inspeção deve ser realizada com microscópios;
- 6- Montagem dos componentes convencionais - Segue o fluxo normal de montagem que seria inserção dos terminais nos furos, e posterior soldagem por meios normais ou máquina de onda.

No caso dos componentes chamados Chip-on-Board, a diferença está em que neste caso os componentes não possuem o encapsulamento presente nos SMDs. O componente é montado diretamente sobre a placa e é então recoberto por um material pastoso, para que não seja maculado. Se todos os componentes fossem produzidos sem terminais, as placas poderiam prescindir dos furos. No entanto, o estágio tecnológico atual não permite que todos os componentes sejam do tipo montados em superfície. Alguns ainda necessitam possuir terminais de inserir. Além disto, a furação continua sendo necessária quando se requer interligação das superfícies condutoras de uma placa multicamadas (multilayer), ou de face dupla. É possível e mais comum hoje em dia a montagem dos componentes em superfície em um lado da placa e, no outro, os componentes por terminais com inserção automática. Na soldagem deste tipo de componente são utilizados métodos, tais como a soldagem por fase de vapor, no qual a solda já depositada e o componente são aquecidos simultaneamente; e a soldagem onde o componente é imerso em solda.

2.11.- Utilização de Sistemas de computação na Fase de Projeto e Fabricação

Os equipamentos de CAD para geração e usinagem de PCIs têm tido o seu custo diminuído, na medida em que têm sido desenvolvidos sistemas para utilização em computadores pessoais. Até recentemente, os softwares para computadores pessoais (PC) foram dirigidos para desenhos mecânicos e esquemas. Entretanto, muitos programas têm surgido nos últimos anos para otimizar a geração de placas de circuito impresso, e praticamente todos são dirigidos à utilização em PC.

Os novos softwares para PC são dedicados à diferentes faixas de aplicação de geração de PCIs. Alguns simplesmente aumentam a velocidade de geração de placas que poderiam ser geradas manualmente. Outros padronizam vários tipos encontrados em sistemas de CAD mais poderosos.

Muitos programas baseados nos computadores PC apoiam o uso de plotadores com penas para a arte final. A arte final desenhada é então reduzida para produzir o fotolito utilizado na confecção da placa. Muitas artes realizadas em computador necessitam de retoque manual. Um dos exemplos que requer retoque manual, é quando uma ilha de uma placa fica colocada fora da malha utilizada para centralização das mesmas. Os programas geralmente incluem instruções de como retocar para produzir uma arte em boas condições. Muitos dos softwares são disponíveis para versões de computadores de 16 BITS compatíveis com os IBM-PC ou Apple-II e estas utilizam geralmente caracteres ASCII. Alguns programas de diferentes fabricantes podem fazer a ligação entre as ilhas automaticamente. Este é limitado à produção de placas de duas

faces, com regras de projeto semelhantes às das que possuem as ilhas ligadas manualmente. O programador pode estabelecer os pontos de saída e chegada, e o programa, através de rotinas, estabelece a ligação entre os pontos na menor distância, sem interferência no resto do circuito.

Circuitos complexos, consistindo de muitas faces, requerem tipos especiais de ferramenta de CAD. Um tipo de programa para PC que se destina a produção de placas do tipo multiface pode aceitar informações de até 50 faces. Como exemplo, o programa PC-CARD que contém cerca de 500 tipos de componentes, 2000 tipos de filetes e redes de localização, e 10000 tipos de pinos e ilhas. Muitos destes programas utilizam a captura de imagens de esquemas e desenhos através de câmeras, que introduzem estas imagens no computador. Estas podem ser alteradas e memorizadas permitindo alterações posteriores/25//26/.

Na fabricação de PCIs, isto é bastante importante, já que muitas modificações são feitas nas placas, havendo necessidade de velocidade nestas alterações. Outros programas possuem ainda a capacidade de geração de programas para furação das placas de circuito impresso /5/.

Um destes programas chamado de PCAD gera através de um programa suplementar chamado PCDRILL, a partir da arte final da placa, um arquivo em linguagem de máquina para furação das mesmas. Este programa é compatível por exemplo com as máquinas EXCELLON e com os computadores da linha PC. Outro programa chamado PCB LAYOUT da empresa Douglas Electronics, cria também arquivos para furação, e é compatível com computadores da linha Apple/MacIntosh.

Com a diminuição dos custos dos sistemas de CAD para geração de PCIs e a possibilidade de geração de programas para furação, conseguem-se através da utilização de máquinas com NC para furação de PCIs uma maior velocidade de produção, já que modificações no projeto das placas são rápidas e sua passagem para a linha de produção é imediata. É de suma importância que qualquer máquina de NC para furação de PCIs tenha comunicação com os programas gerados através dos CADs, para obtenção de uma maior flexibilidade e eficiência na fabricação.

A seguir dá-se uma pequena relação de softwares utilizados, seus custos estimados em dólares e os hardwares requeridos (situação em 10/89 dados dos fabricantes).

Nome do Programa	Computador compatível	Custo
Markets PCB layout	Apple Macintosh	US \$ 895
PCAD	IBM PC XT ou AT	estação de trabalho e software US \$ 20000
CAD Master	IBM PC XT AT e compatíveis	US \$ 1495
smARTWORK	IBM PC XT AT e compatíveis	US \$ 895
PCB layout (Douglas)	Apple MacIntosh	---
ORCAD	IBM PC XT AT e compatíveis	---

Destes, tanto o PCAD quanto o PCB layout (Douglas) possuem programas para gerar arquivos de furação /26/.

CAPÍTULO III

ELEMENTOS MECÂNICOS E MOTORES

3.1) Introdução

Nas máquinas ferramentas, de uma maneira simplificada, são observados dois tipos de movimentos principais, que são os movimentos de corte e o movimento de avanço que para furadeiras serão executados pelo cabeçote. Outro movimento observado é o de posicionamento da peça em relação à ferramenta. Nas Furadeiras CNC este movimento relativo entre peça e ferramenta é assegurado pela utilização de Sistemas Posicionadores. A necessidade de utilização destes tem crescido rapidamente nos últimos anos, pois cada vez mais o posicionamento de partes e montagens tem sido feito com envolvimento manual mínimo.

Os Posicionadores são formados por componentes mecânicos, motores e seus acionamentos e sensores (Fig 3.1). Dá-se neste capítulo uma visão dos tipos de componentes que podem ser empregados para realização de sistemas de posicionamento e avanço, além de informações à respeito dos sistemas empregados para execução do movimento de corte.

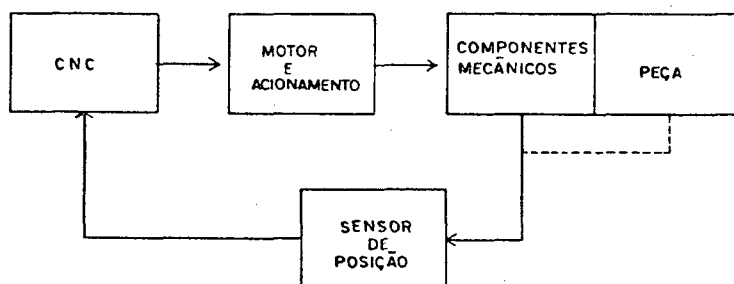


Fig 3.1- Composição de um posicionador de 1 eixo

3.2) Componentes Mecânicos

Os componentes mecânicos de um posicionador, são considerados todos aqueles à partir do servomotor até a ferramenta ou peça que está se movimentando, e são divididos em :

3.2.1) Guias de Movimento

As Guias de Movimento são os componentes mecânicos que permitem os movimentos relativos entre peça e ferramenta, definindo em quais sentidos e com quantos graus de liberdade ocorrerão estes deslocamentos.

As guias são os "eixos" retificados (partes fixas) que em conjunto com buchas, rolamentos lineares, etc, (partes móveis), formam um sistema de guia. Estes serão genericamente chamados neste capítulo de guias, e precisam ter algumas características para projeto que são:

- Baixo coeficiente de atrito;
- - Precisão elevada;
- Rigidez elevada.

Os sistemas podem ser classificados segundo a maneira pela qual ocorre o contacto entre as partes móveis e fixas, e são chamados de guias de deslizamento, guias de deslizamento fluídico e guias de rolamento.

3.2.1.1) Guias de deslizamento

Este sistema de guia é também conhecido como barramento e a movimentação ocorre pelo deslizamento entre duas superfícies (geralmente metálicas). Existem 04 tipos mais comuns destas classificadas segundo suas características geométricas que são: guias planas, guias em V, guias "rabo de andorinha" e guias cilíndricas. Os barramentos convencionais possuem coeficiente de atrito variando entre 0,15 à 0,30 (poise η) em média. Por isto, surgiram melhorias nos sistemas de lubrificação das guias, nos graus de acabamento superficial, etc. Além disto tem sido utilizados insertos de materiais com menor rugosidade superficial tipo Teflon aplicado sobre uma das superfícies com sentido de redução no efeito " Stick-Slip", presente neste tipo de guia devido ao atrito. As características gerais destas guias são:

- Alto coeficiente de atrito estático;
- Elevada rigidez estática;
- Coeficiente de atrito dinâmico crescente para velocidades elevadas.

Atualmente devido as exigências das máquinas modernas em relação às altas velocidades de trabalho e redução de potência dos sistemas, este tipo de guias está sendo substituído por outros mais eficientes.

3.2.1.2) Guias de deslizamento Fluídico

São guias bastante semelhantes às de deslizamento com a diferença de que não há contacto entre superfícies metálicas pois

existe entre a superfície móvel e fixa uma película de um fluido que é injetado à uma determinada pressão, suficiente para que haja equilíbrio com as partes móveis e as cargas apoiadas. Estas poderão ser guias hidrostáticas e guias aerostáticas segundo o tipo de fluido empregado.

As guias hidrostáticas utilizam o óleo hidráulico como fluido e por causa das dificuldades de projeto são usadas somente em máquinas de grande porte. Como vantagens destas teremos o baixo coeficiente de fricção e o baixíssimo desgaste verificado nas superfícies, que pela forma construtiva da guia não ficam em contacto. A maior desvantagem é que o projeto deste tipo de guia é complexo, oneroso, e o controle do suprimento de óleo é também bastante difícil. Além disto a rigidez destas não é tão elevada como nas guias de deslizamento devido à falta de rigidez do óleo hidráulico.

Já as guias aerostáticas utilizam o ar como separador entre as duas superfícies de deslizamento. A excepcional baixa fricção e a quase inexistência de desgaste entre as partes que deslizam são propriedades vantajosas nas guias aerostáticas. Mas estas possuem como desvantagem o fato de existir facilidade para oscilações devido à baixa rigidez mecânica do ar que preenche os espaços entre as superfícies. Além disto, seu custo é elevado e as tolerâncias para fabricação são altas /35/ /31/.

3.2.1.3) Guias de rolamento.

Nestas ocorre o rolamento entre componentes mecânicos da parte móvel do sistema de guia sobre a parte fixa. Genericamente são chamadas de guias lineares, que são a união entre os rolamentos circulares, ou lineares e as guias de aço. Suas vantagens são:

- Maior precisão de posicionamento;
- Menor consumo de energia;
- Possibilidade de emprêgo de velocidades maiores;
- Maior vida útil;
- Maior facilidade de instalação.

A tendência, nos dias de hoje, é a da utilização das guias lineares, principalmente pelo grande desenvolvimento da eletrônica e dos CNCs que justificam maior precisão e velocidade de posicionamento. As guias permitem aceleração de partida mais rápida e precisão de posicionamento mais elevada. As velocidades de translação com essas guias podem ser superiores a 200m/min e a superfície para instalação da guia pode possuir um grau de acabamento superficial não muito elevado. Os tipos de guias lineares são: Guia linear de rolamento de esferas; Guia linear de roldanas; Buchas Lineares(Ball Bushing); Guia de eixo estriado(Ball Spline); Guia de roletes ou de esferas; Guias de roletes ou de esferas recirculantes. Destas, as mais utilizadas em

máquinas leves devido ao seu menor custo e a maior capacidade de carga, são as guias do tipo com buchas lineares(Fig 3.2).

Este tipo de sistema de guias consiste na utilização de rolamentos lineares circulares que se deslocam sobre uma guia temperada e retificada. Estas guias podem ser apoiadas, em toda sua extensão, ou engastadas nas pontas. Quando forem totalmente apoiadas, podem ser utilizados rolamentos lineares abertos e, quando forem apoiadas, somente nos extremos podem ser utilizados rolamentos lineares fechados. Com este sistema de guias, consegue-se um baixíssimo coeficiente de atrito, que varia de 0.002 à 0.004η , e que proporcionará um movimento bastante suave. As buchas lineares são usadas para máquinas operatrizes leves, impressoras, plotters, equipamentos de medição, e não devem ser submetidas a movimentos de rotação /19//15//35/.

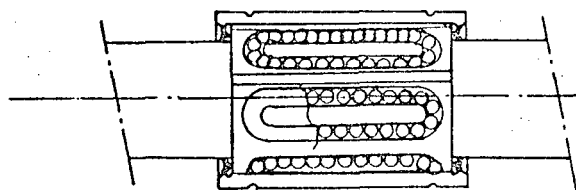


Fig 3.2- Buchas Lineares

Já nas guias de roletes ou de esferas recirculantes, os trilhos devem ter uma dureza de 60 à 64 HRC e, no caso das guias de esferas recirculantes, o coeficiente de fricção deverá ser de 0.001 à 0.004η . Além de possuírem baixo nível de ruído e baixa altura em conjunto com o trilho, (Fig 3.3), eles não possuem limitação com relação aos comprimentos dos mesmos, já que podem ser retificados simultaneamente, ou seja, os fabricantes retificam trechos de trilhos em conjunto, conseguindo com isto comprimentos totais de até 14 metros. Estes sistemas de guias possuem possibilidade de operação com alta velocidade linear (acima de 200 m/s com esferas recirculantes), mas seu custo é bastante elevado, limitando seu uso a máquinas de maior porte.

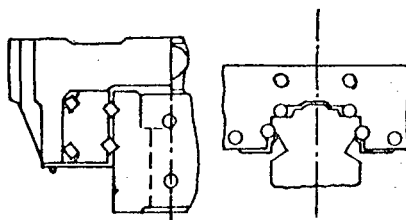


Fig. 3.3- Guias de esferas ou de roletes recirculantes

3.2.2) Transmissões Mecânicas

As transmissões mecânicas em posicionadores podem ser utilizadas para transformar o movimento rotativo do motor em movimento de translação retilínea ou alterar as velocidades de sistemas mecânicos rotativos, sendo por isto divididas em transmissões conversoras tais como fusos de esferas recirculantes, fusos de deslizamento, etc, e transmissões transformadoras que podem ser por exemplo engrenagens, polias e correia sincronizadora, etc. Segue-se uma descrição sucinta dos tipos de transmissões utilizadas em posicionadores.

3.2.2.1) Fusos de Deslizamento

Os fusos de deslizamento consistem de uma porca também chamada de castanha que movimenta transversalmente sobre um parafuso que gira. Tal como no caso dos sistemas de guias, podem ser do tipo deslizamento simples e deslizamento fluídico. Nos fusos de deslizamento simples o contacto é de escorregamento entre duas superfícies metálicas resultando numa eficiência baixa e elevado coeficiente de atrito. Além disto as folgas decorrentes do desgaste que ocorre entre o parafuso e a castanha são proporcionais ao uso e há dificuldade de se prever o tempo de vida útil. As vantagens incluem a capacidade de auto-travamento no modo de transmissão invertida, baixo custo inicial, facilidade de fabricação, grande gama de materiais que podem ser empregados e rigidez elevada.

Já os fusos de deslizamento fluídico possuem a vantagem do baixo coeficiente de atrito encontrado já que o deslizamento se dá sobre um fluído (ar ou óleo hidráulico) não havendo praticamente desgaste. Podem ser dos tipos hidrostáticos e aerostáticos, e necessitam de instalações para pressurização dos fluídos. São aplicados somente em casos especiais devido a seu elevado custo.

3.2.2.2) Fusos de Esferas Recirculantes

Os fusos de esferas recirculantes apresentam um funcionamento bastante semelhante ao dos fusos de deslizamento, tendo contudo ainda um ou mais circuitos de esferas localizados entre o fuso e a castanha, que executam um caminho fechado de recirculação através dos dispositivos recirculantes(Fig.3.4). O maior número de partes móveis comparado com o dos fusos de deslizamento simples provoca uma maior dificuldade de ajuste principalmente quanto à rigidez. O fuso tem roscas com formas que permitem a condução das esferas helicoidalmente em torno do parafuso.

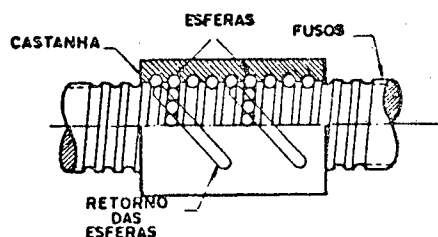


Fig.3.4- Fuso de esferas recirculantes

Três versões são conhecidas para recirculação das esferas nas castanhas dos fusos de esferas recirculantes:

a) O sistema de recirculação tem retorno das esferas por dentro da castanha.

b) Os trechos para recirculação são colocados imediatamente depois de uma volta forçando a um retorno das esferas ao ponto de partida. Neste caso é necessário que a castanha possua ao menos 2 circuitos de esferas na circunferência.

c) O retorno das esferas é feito através de um tubo ou canal externo à castanha.

Sempre o número de voltas e dos circuitos de recirculação de uma castanha estarão indicados em seu catálogo.

A rigidez axial de um fuso é sempre menor que a rigidez torsional do mesmo. Além disto há também grande dificuldade de se fabricar fusos e castanhas sem folgas. Por isto há necessidade de montagem dos fusos segundo um dos 4 casos de apoio e ancoragem (ver referências 35 e 15) para que seja aumentada a rigidez. No caso das folgas pode-se utilizar a pré-carga entre castanha, fuso e esferas para que haja eliminação das mesmas.

Existem várias formas de se aplicar a pré-carga. Quando se utilizam 2 castanhas a pré-carga poderá ser do tipo compressão ou tração (Fig.3.5). Pode-se também utilizar alguns métodos com apenas 1 castanha nos quais se permite quase sempre somente pré-cargas leves /15/.

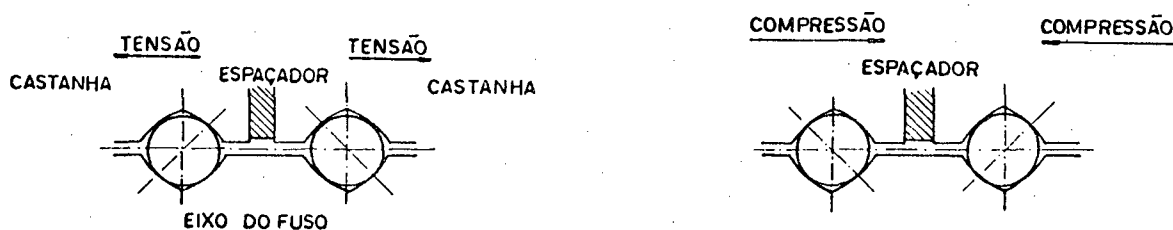


Fig.3.5- Formas de aplicação da pré-carga

Os fusos de esferas recirculantes são classificados segundo as variações de deslocamento máximas por deslocamento linear de 300mm. Assim, os fusos são classificados em classes segundo a tabela 3.1:

Classe	C0	C1	C2	C3	C5	C7	C10
$IE = 300 \cdot$	3,5	5	7	8	18	50	$210[\mu m]$

* em micrometros por 300 milímetros

Tab 3.1- Classe dos fusos por 300 mm

Os fusos podem ter dois tipos de acabamento da superfície: laminado ou retificado. Sabe-se, previamente que um fuso laminado somente terá uma variação de deslocamento maior do que o grau C7, e portanto os graus de precisão C0 à C5 só são possíveis de serem atingidos com fusos retificados. Além disso, em função das folgas no sentido axial, os fusos podem ser classificados segundo a tabela 3.2:

	Z	T	S	N	L
FOLGA	0,0	0,005	0,020	0,050	0,30 $[\mu m]$
em pré-car-					
$[mm]$ regado	máx.	máx.	máx.	máx.	

Tab 3.2- Classificação dos fusos em função das folgas axiais

Vantagens dos fusos de esferas são a longa vida útil de serviço devido a baixa taxa de desgaste, a alta eficiência de trabalho para qualquer modo de transmissão e a ausência de folgas principalmente quando se usa a pré-carga. Uma desvantagem é a limitada escolha de material para fabricação e o alto custo relativo em relação aos fusos de desgaste simples.

3.2.2.3) Sistema Pinhão-Cremalheira

A transmissão pinhão-cremalheira é especialmente utilizada quando grandes percursos, (acima de 4 m), devem ser executados e para os quais os fusos de esferas recirculantes deixam de ser a melhor solução. A inércia do sistema pinhão-cremalheira deverá ser menor e a rigidez maior quando comparados aos fusos de deslizamento e de esferas recirculantes /35/.

Podem haver problemas de linearidade neste sistema de transmissão devido a folgas existentes em engrenamentos que poderão se acentuar com o desgaste provocado pelo funcionamento. Deve-se procurar periodicamente ajustar estas que poderão ser totalmente eliminadas utilizando-se algumas soluções /35/.

3.2.2.4) Transmissão por Polias e Correias Sincronizadoras ou Dentadas

A prevenção do escorregamento nas correias convencionais pode ser feita utilizando-se polias e correias sincronizadoras. As correias possuem um perfil dentado, que faz contato com o correspondente engrenamento das polias que são providas do mesmo engrenamento positivo das engrenagens. Inicialmente o perfil utilizado em correias sincronizadoras foi o trapezoidal (Fig.3.6). Atualmente podem ser encontradas também com perfis de forma circular, que reduzem as tensões sobre os dentes.

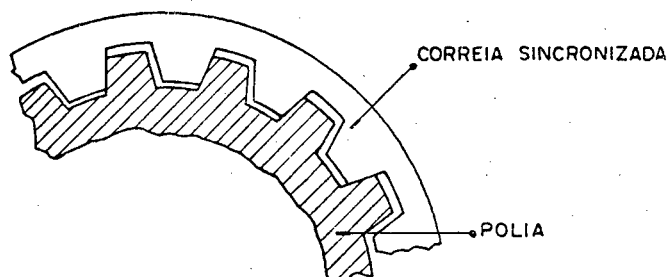


Fig.3.6- Correia sincronizadora com perfil trapezoidal

A rigidez do sistema dependerá da rigidez à tração da correia e da rigidez a compressão e flexão dos dentes da correia. Já a inércia do sistema dependerá da inércia das polias e as folgas podem ser consideradas praticamente nulas. Por isto correias com esta configuração são indicadas para utilização em posicionadores de máquinas-ferramenta leves, com também em máquinas têxteis, eletrodomésticos, equipamentos para escritório, eixos cames de motores, etc /6/.

3.2.2.5) Transmissão por Engrenagens

As engrenagens são mecanismos que permitem a transmissão de rotação por meio de pinhões ou rodas dentadas, sendo bastante duráveis e robustas. Elas podem transmitir altas potências com eficiência e são largamente empregadas em máquinas convencionais. A inércia em transmissões por engrenagens será dada pelo somatório da inércia de seus componentes e portanto as engrenagens deverão ter o menor peso possível, utilizando materiais leves, mas sem comprometer sua rigidez.

Quando empregados em posicionadores, em que há necessidade de transmissão de movimento sem folgas, é necessário o emprego de algumas soluções, já que as folgas estão sempre presentes neste tipo de transmissão.

Uma das soluções é o ajuste da distância entre centros para minimizar as folgas, mas isto poderá resultar em interferência entre as engrenagens. As dilatações e contrações térmicas poderão também causar interferência ou aumentar as folgas. Para isto deve-se

providenciar um isolamento térmico entre o eixo ao qual a engrenagem será conectada e a mesma, para evitar transmissões térmicas.

Outra forma utilizada para redução das folgas é a utilização de engrenagens "anti-folga" que vem a ser engrenagens duplas que podem ser deslocadas no sentido transversal e possuem suas duas partes ligadas através de molas que fornecem tensão apropriada /12/.

Apesar destes cuidados, o desgaste que ocorre deverá ser sempre minimizado através de reajustes periódicos.

3.2.3) Acoplamentos

Eixos com desalinhamento ou mesmo colocados com angulações diferentes, podem ser conectados através de acoplamentos que são peças destinadas a unir eixos compensando os erros de alinhamento e afastamentos axiais já que os comprimentos comerciais dos mesmos estão limitados pelos processos de fabricação. Os acoplamentos deverão ser isentos de folgas, resistentes à torção e com inércia reduzida. Além disso sua fixação obedecerá alguns critérios já que deverá ser rígida e sem folgas. Dependendo das necessidades podem-se utilizar os seguintes tipos: acoplamentos rígidos, acoplamentos de engate e acoplamentos de compensação /12//35/.

Os acoplamentos rígidos são os mais comuns e conservam os dois eixos numa posição invariável, girando em volta do mesmo eixo geométrico. São utilizados somente quando os eixos são coincidentes e por causa da dificuldade prática de se colocar e manter duas árvores em alinhamento exato, um acoplamento rígido poderá induzir tensões que acarretam falhas por fadiga e desgaste.

Os acoplamentos de engate são aqueles em que há possibilidade de conexão e desconexão com as árvores em movimento. Estes dois primeiros tipos são pouco utilizados na construção de posicionadores.

Já os acoplamentos de compensação permitem dentro de certos limites uma mudança de posição entre os eixos. Este movimento pode ser axial, transversal ou angular. Se estes deslocamentos não forem retirados poderão ocasionar alterações em eixos, mancais, desengrenamento de rodas dentadas, etc.

Existem diversos tipos de acoplamentos de compensação e os mais comuns são: acoplamentos de encaixe com anel de centragem, acoplamentos Oldham, Junta Cardan, acoplamentos por engrenagens, acoplamentos de corrente, acoplamentos de discos, acoplamentos por diafragmas, acoplamentos helicoidais e acoplamentos de folas metálicos. Apresentam-se aqui as descrições dos tipos mais utilizados.

3.2.3.1) Acoplamentos Oldham

São os acoplamentos mais comumente utilizados e possuem mobilidade com movimentos transversais. Os eixos são separados a uma pequena distância e em cada extremo estão pratos providos de ranhuras e unindo estes um disco com saliências prismáticas (Fig.3.7). A inércia neste tipo de acoplamento não é elevada e poderão ser transmitidas baixas potências com média precisão.

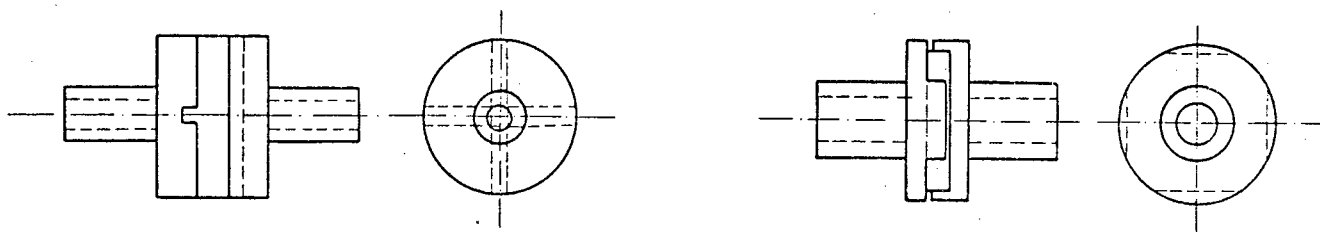


Fig 3.7- Acoplamento Oldham

3.2.3.2) Acoplamentos de Discos

São acoplamentos que se destinam a faixas de baixa a alta potência e altas velocidades. As folgas podem ser nulas e a inércia é dependente da inércia da carga.

3.2.3.3) Acoplamentos por diafragmas

É muito similar ao acoplamento de disco flexível exceto que o torque é transmitido através de diafragmas metálicos de contorno (Fig.3.8). Permite-se desalinhamentos angulares e paralelos, as folgas podem ser nulas e a inércia depende da carga. As faixas de carga a que se destinam estes acoplamentos são as mesmas que no caso do acoplamento de discos.

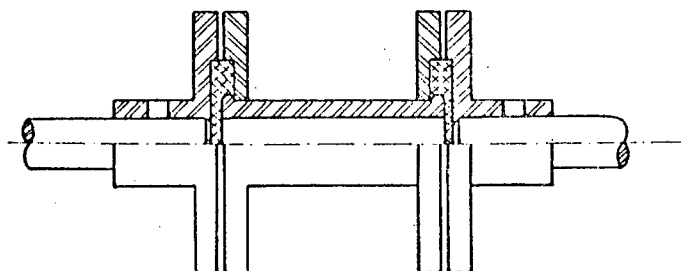


Fig.3.8- Acoplamento por diafragmas

3.2.3.4) Acoplamentos por Corrente

De baixo custo e alto torque transmitido estes acoplamentos toleram um pequeno desalinhamento. Dois cubos opostos possuem rodas dentadas sobre as quais é montada uma corrente (Fig.3.9). O acoplamento é bastante rígido torsionalmente e a inércia é maior quando comparado aos acoplamentos Oldham. Um tipo de acoplamento semelhante é o de engrenagens no qual duas flanges com dentes internos engatam em uma manga com dentes externos. Ele possui alta flexibilidade torsional e é muito tolerante a vibrações e a choques.

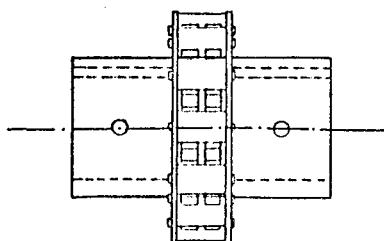


Fig.3.9- Acoplamento por Corrente

3.2.3.5) Acoplamentos de Foles

Para aplicações de baixa carga com baixa inércia e alta capacidade torsional isento de folgas podemos utilizar os acoplamentos de foles, que permitem a transmissão de velocidades de até 10.000 RPM.

3.2.3.6) Acoplamentos Helicoidais

Projetado como uma árvore curvada que transmite movimento sem folga e com velocidade constante, a peça de acoplamento helicoidal é única, possuindo inércia dependente da carga, alta rigidez torsional e transmitindo baixa e médias cargas com precisão (Fig.3.10). Muito semelhante a estes existem os acoplamentos de molas que permitem a transmissão de altas cargas apesar da rigidez torsional não ser tão elevada.



Fig.3.10- Acoplamento Helicoidal

3.2.3.7) Acoplamentos Flexíveis (tipo Falk)

A união é feita por uma série de molas planas unidas formando uma envolvente cilíndrica, colocando entre os dentes feitos nos pratos de acoplamento na forma de ranhuras (Fig.3.11). Os flancos dos dentes são curvados permitindo que a mola deforme-se por efeito da carga. Além disto pode-se apoiar com maior ou menor força contra os flancos, segundo o tamanho da deformação de modo que a distância entre apoios da barra mola é tanto menor quanto maior é a flexão. Este tipo de acoplamento opera com médias velocidades, médias cargas e a rigidez torsional é alta.

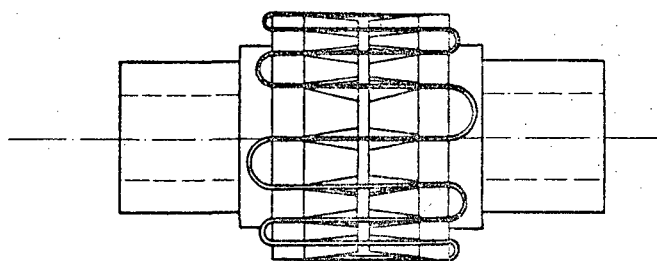


Fig.3.11- Acoplamento flexível

3.3) Motores

Motores são transdutores que convertem energia da forma elétrica em forma mecânica. A energia elétrica aplicada ao motor causa o giro do eixo do motor.

A correta utilização de um determinado tipo de motor em uma máquina - ferramenta depende da seleção deste motor, levando-se em consideração as necessidades dinâmicas da máquina, sem naturalmente exceder as limitações de torque e de temperatura do motor. O primeiro passo na seleção do motor vem com a determinação das características de carga, força, torque, velocidade e ciclo completo, que afetam a força e a aceleração do motor.

Existem três tipos de motores mais empregados em máquinas controladas automaticamente. Os três tipos são:

3.3.1) Servomotores de corrente contínua

Os servomotores de corrente contínua são motores de alta desempenho e são os mais utilizados em máquinas CNC e outras aplicações, onde as partidas e paradas devem ser feitas rapidamente e com precisão. Os servomotores possuem baixo peso e armaduras, que respondem prontamente às mudanças de tensão. O rotor gira em um campo magnético localizado entre o rotor e o estator, e o campo fornece ao um fluxo magnético radial ao rotor.

O torque gerado pelo motor deve ser controlado pela corrente de armadura ou pela corrente de campo e a velocidade pela tensão de armadura. A constante de tempo mecânica do motor é diretamente proporcional à inércia da armadura. Como o momento de inércia de um cilindro sólido é igual a $1/2 MR$ ao quadrado, é possível reduzir-se a inércia da armadura cilíndrica reduzindo o diâmetro, o peso da armadura ou os dois. Com o desenvolvimento de novos materiais magnéticos e o projeto de armaduras de baixa inércia foram maximizados o torque e a inércia e minimizados a resposta destes motores. Apesar das vantagens dos servomotores de corrente contínua os mesmos possuem as seguintes desvantagens:

- Manutenção preventiva periódica devido a utilização de coletor para comutação mecânica da corrente nas espiras do rotor;
- Impossibilidade de redução maior da inércia em função de o servomotor possuir enrolamentos no rotor e estator;
- Troca de calor dificultada pelo fato dos enrolamentos do rotor, que é interno, dissiparem calor.

Outro tipo de servomotor de corrente contínua é o motor sem escovas (Brushless) que é constituído como um servomotor CC comum de "dentro para fora". Possui um rotor de imã permanente e um estator eletromagnético. Em vez de utilizar escovas, entretanto, a comutação é realizada eletronicamente, utilizando-se um codificador para informar a eletrônica sobre posições relativas do estator e rotor que confere ao motor maior velocidade máxima e mais facilidade de transferência de calor produzido somente no estator.

3.3.2) Servomotores de corrente alternada

Avanços recentes na eletrônica de controle estão produzindo servomotores de corrente alternada que são basicamente motores de indução reversíveis, com fases, e modificados para a servo-operação. Esses motores tem a vantagem de serem mais baratos de fabricar que os motores CC, não possuem escovas, possuem potência elevada e não ter enrolamento no rotor.

Existem duas formas para regular velocidade nestes motores que são através do circuito de armadura e do circuito de excitação. A velocidade (v) do motor é obtida da relação $v=f/p$ onde f = frequência de alimentação e p = número de pares de polos. Para se variar a velocidade do motor necessita-se variar o número de pares de polos e/ou a frequência de alimentação. A variação do número de polos requer modificações nos motores. Portanto a forma mais apropriada de variação de velocidade será através de variação na frequência de alimentação.

Duas soluções construtivas podem ser aplicadas para servomotores CA:

3.3.2.1) Servomotores CA Assíncronos

O emprego de servomotores CA assíncronos analisando-se o comportamento estático e dinâmico é semelhante ao conseguido em corrente contínua. Eles possuem enrolamentos no estator e no rotor e seu controle é extremamente complexo. São isentos de manutenção pois são os motores mais utilizados para velocidades constantes, de baixo custo, mas ainda não muito utilizados industrialmente devido à complexidade do seu controle através de um variador de frequência que utiliza um modelo não linear. O controlador necessita portanto ser microprocessado sendo possível sua execução mas a um custo ainda muito elevado.

3.3.2.2) Servomotores CA Síncronos

Os servomotores CA síncronos possuem um só local de enrolamento que é no estator, o que permite dissipação do calor com maior facilidade. O rotor é praticamente oco possuindo ímãs permanentes com alta capacidade de armazenagem de energia magnética por volume resultando em baixo volume do motor e baixo peso. Estes motores são semelhantes aos servomotores CC sem escovas, mas o estator é alimentado com corrente de forma senoidal comutada, não necessitando de comutação eletrônica. Comparando-se com um servomotor CC análogo possui peso 50% menor; volume de 20 à 50% menor e momento de inércia de 60 à 75% menor /61/. Existe uma tendência mundial de utilização cada vez maior de servomotores CA síncronos devido a estas características e pelo fato de que praticamente não necessitam de manutenção /10/.

3.3.3) Motores de Passo

O motor de passo é um transdutor eletromecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos chamados de passos que vem a ser um avanço elementar (rotação ou translação) de amplitude constante. O motor recebe um número determinado de impulsos e determina um número correspondente de passos. A sucessão de impulsos a uma frequência determinada, permite sempre, que não houver sobrecarga, impor ao rotor uma velocidade de rotação ou translação. Tal comando de posição e velocidade, torna o motor um transdutor altamente confiável e de simples comando por sistema digital.

Os motores de passo oferecem vantagens significativas em relação aos servomotores de corrente contínua e corrente alternada análogos a eles. A característica síncrona do motor permite a operação de sistemas posicionadores em malha aberta dispensando a realimentação

o que reduz custos e simplifica o sistema de controle. Apesar disto, se for desejado o motor de passo pode ser usado em sistemas com sinais de realimentação discretos. Possuem resolução básica desde a mínima de 0.72 até 90 graus. Eles apresentam sem carga imprecisão de posicionamento de 5% de um passo por passo sendo que os erros não são cumulativos por volta, isto é, após 360 graus o erro sempre volta a zero. Os custos do sistema de controle são bastante reduzidos pela operação em malha aberta e os motores de passo devem sempre ser considerados como integrantes de um sistema de acionamento. Por isso tanto as cargas quanto os drivers (fontes de energia elétrica) devem ser analisados cuidadosamente para se obter um bom desempenho do motor. Outras vantagens destes motores são robustez mecânica, modularidade, baixo ruído e facilidade de instalação. Apesar disto quando comparados à motores DC análogos apresentam restrições devido ao torque limitado e dificuldade de operar com grandes variações de carga e velocidade.

Suas propriedades podem ser utilizadas p/ ex. para as seguintes funções: funcionamento incremental de posicionamento, comando de velocidade, comando de dispositivos de ajuste e regulagem, além de serem facilmente interfaceados com sistemas digitais com base em Microcomputadores, Controladores Lógicos Programáveis, etc.

Os motores de passo possuem duas partes mecânicas principais uma fixa e outra móvel. A parte fixa geralmente suporta os enrolamentos. A parte móvel é o rotor que pode possuir ímãs permanentes ou não. A ausência de fluidos e escovas garante a robustez mecânica, e o princípio geral do funcionamento dos motores de passo é bastante simples, e se baseia nas forças de atração e repulsão exercidas entre polos magnéticos. Para permitir uma melhor resolução por passo somam-se mais polos ao estator e rotor.

3.3.3.1) Tipos de Motores de Passo

Pode-se classificar os motores de passo segundo o tipo de movimento produzido e a forma construtiva dos mesmos. Quanto à forma de movimento os motores poderão ser do tipo linear ou angular. Os motores do tipo angular são disponíveis em maior quantidade para várias potências e tamanhos e necessitam de elementos mecânicos de transmissão conversora para transformar seu movimento de rotação em translação. Os motores do tipo linear possuem a vantagem de não necessitar de elementos de transmissão conversora e podem ser utilizados para algumas aplicações industriais específicas/48//49/. Apesar das vantagens ainda não são encontrados em uma grande gama de potências e portanto trataremos a partir de agora somente dos motores angulares.

Quanto à forma construtiva existem basicamente, três tipos de motores de passo: motores à relutância variável (circuito simples ou multicircuitos), motores à ímã permanente e motores híbridos. Destes, os mais utilizados são os motores do tipo híbrido, (Fig 3.12), que combinam em si características dos outros tipos, permitindo simultaneamente um grande número de passos por volta uma frequência de trabalho relativamente elevada e bom amortecimento de oscilações o que os torna bastante úteis em aplicações em posicionadores de máquinas-ferramenta.

O rotor de um motor de passo híbrido é composto de duas sapatas polares, com um ímã permanente entre estas. As sapatas e os pólos salientes do estator são denteados. Em volta dos polos salientes do estator estão enroladas as bobinas. O número de dentes do rotor é diferente do número de dentes do estator. As duas sapatas são idênticas, entretanto enquanto os dentes dos estatores correspondentes às duas seções são perfeitamente alinhados os dentes das sapatas do rotor estão desalinhados de $1/2$ dente do rotor.

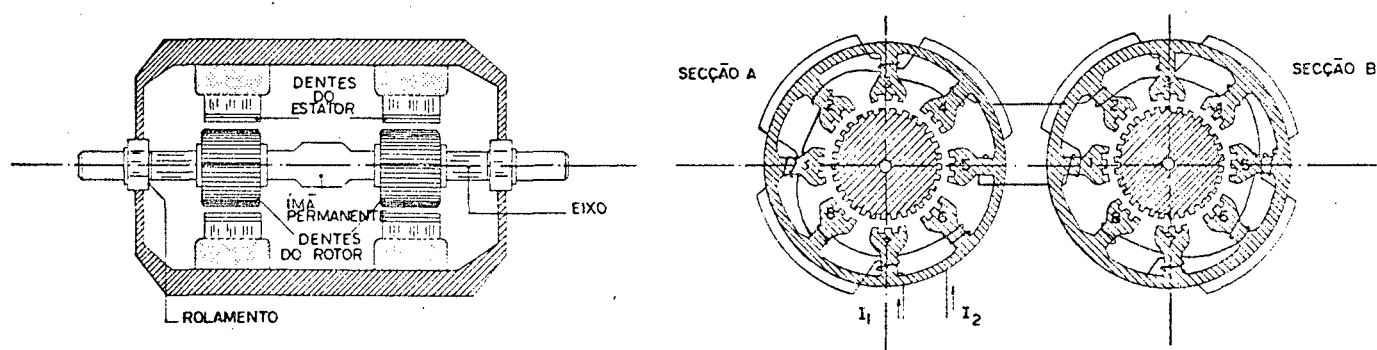


Fig.3.12- Motor de passo tipo híbrido

3.3.3.2) Tipos de enrolamento, Alimentações e modos de acionamento

Motores de passo necessitam de uma fonte de energização que produza um campo girante discretizado no entreferro. Este se obtém alimentando-se os enrolamentos em uma sequência conveniente. Certos motores de passo podem atingir frequências de operação da ordem de 100.000(pps) por segundo, para o que o chaveamento dos enrolamentos deve ser efetuado em frequências correspondentes. O movimento do rotor nos motores à ímã permanente e híbridos é definido pela polaridade das correntes aplicadas às fases. Correntes com dupla polaridade ou duas bobinas por pólo do estator enroladas em sentidos opostos são necessárias para estabelecer os campos adequados nos dentes do estator e movimentar o rotor para outra posição.

O enrolamento único por fase é chamado de enrolamento unifilar e necessita de alimentação bipolar. O duplo enrolamento é conhecido como enrolamento bifilar necessitando de alimentação

unipolar. O motor bifilar apresenta uma queda de 30% de torque em baixa velocidade quando comparado ao motor unifilar análogo com mesmo número de espiras no enrolamento, por ter o diâmetro do fio reduzido e a resistência aumentada/48/.

Independente da alimentação ser unipolar ou bipolar os enrolamentos do motor de passo podem ser acionados de 4 modos que são:

-Modo Normal que consiste na alimentação de duas fases simultaneamente para se estabelecer o passo. O acionamento das duas fases ao mesmo tempo fornece um ganho de aproximadamente 20% no torque disponível por Watt com relação ao acionamento de fase única/48//49/. O ângulo de passo não é alterado com relação à alimentação em uma fase, mas a posição de parada do rotor é deslocada de meio ângulo de passo.

-Modo Wave que caracteriza-se pelo acionamento de uma única fase a cada passo. O consumo é menor se comparado ao modo normal.

-Modo meio-passo que consiste do acionamento alternado de duas fases seguindo-se do acionamento de uma fase, permitindo dobrar a resolução do motor. A mudança de duas fases acionadas para uma provoca flutuação no torque que é evitada com redução da corrente de $\sqrt{2}$ vezes para situação de duas fases alimentadas/24/.

-Modo Micro-Passo que vem a ser a subdivisão de cada passo eletronicamente em um grande número de pequenos passos. Esta técnica aumenta a resolução de posição e a suavidade de funcionamento dos motores de passo híbridos e convencionais e isto é feito através do controle eletrônico nos circuitos de acionamento. Por exemplo um acionamento de modo micro-passo subdivide cada passo de um motor de 200 passos/revolução em 100 micro-passos produzindo 20000 passos/revolução. Pode-se com isto não utilizar redutores e outros componentes mecânicos que faz com que se eliminem as folgas. Outra vantagem da utilização do modo micro-passo é de que são praticamente eliminados os problemas de perda de passo por ressonâncias mecânicas geradas pelo funcionamento dos motores. É necessário que sejam controlados os níveis das correntes dentro de um passo completo. Podem ser utilizados dois conversores D/A como demonstrado na figura 3.13 abaixo. Os níveis de corrente ficam armazenados em memória ROM e a velocidade de leitura define a velocidade do motor. Outra forma de operação em micro-passo é de que um Microprocessador determine os níveis de corrente para cada fase em um passo completo. Para operação suave a forma das correntes deverão ser senoidais.

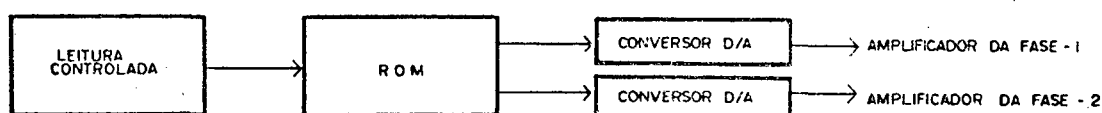


Fig 3.13- Circuito para operação em micro-passo

3.3.3.3) Circuitos de Alimentação

A velocidade de um motor de passo é definida pela frequência de comutação da corrente nas bobinas do motor. Atinge-se a frequência máxima quando o torque dinâmico médio do motor for apenas ainda igual ao torque resistente de atrito da carga mecânica total. A frequência máxima e portanto a velocidade máxima de operação poderão ser aumentadas diminuindo-se a constante de tempo do circuito dos enrolamentos (L/R), o que acarreta a diminuição do torque do motor, por exemplo, quando R é aumentada com consequente redução da corrente. Para operar o motor de passo com velocidades mais elevadas sem redução do torque motor, aplica-se uma alimentação com tensão mais elevada, que vem a produzir efeito semelhante ao da redução da constante de tempo. O método é baseado no tempo que a corrente leva para se estabelecer em uma determinada bobina ($UL = L di/dt$). O circuito de alimentação deve obedecer os seguintes requisitos: A corrente deve se estabelecer no menor tempo possível reduzindo o efeito da constante de tempo elétrica; A corrente deve ser extinta no menor tempo possível visando eliminar o torque de oposição gerado na fase de descarga da bobina; O dispositivo comutador da alimentação deve ser protegido da tensão $-L di/dt$ resultante do corte de alimentação da fase; Nenhuma corrente deve circular no enrolamento que não está sendo utilizado.

Na prática o rápido crescimento da corrente na fase acionada é obtido segundo 3 modos diferentes:

-Alimentação com dois níveis de tensão ou (Bilevel). O torque, como foi visto, é proporcional ao nível de corrente nos enrolamentos. Assim sendo, a velocidade de operação dos motores dependerá do tempo que a corrente leva para se estabelecer nos enrolamentos. No princípio da alimentação por dois níveis, ao ligar um enrolamento alimenta-se-o com uma tensão V muito superior somada à tensão correspondente à corrente nominal. Tão logo a corrente atinja aquele valor, a alta tensão é desligada e a fonte permanente fornece a tensão mantendo a corrente nominal no enrolamento durante o período de tempo da excitação;

-Em um segundo modo utiliza-se resistência em série com o enrolamento que permite diminuir a constante de tempo elétrica do motor. Por sua vez, o valor da tensão deverá ser aumentado já que boa parte da mesma ficará sobre o resistor após o transitório. Apesar da solução funcionar o rendimento é muito baixo da ordem de 10%, já que existirá uma perda de potência, dissipada no resistor, igual a $R \cdot I^2$, sendo R o valor da resistência e I o valor da corrente;

-Chopper. O método consiste na alimentação dos enrolamentos

com uma tensão bem maior que a correspondente à corrente nominal. Quando a corrente no enrolamento atinge um valor maior que a corrente nominal, a tensão é desligada acarretando a queda da corrente até que esta atinja um valor menor que a corrente nominal. O ciclo repete-se fazendo com que a corrente média nos enrolamentos durante a excitação seja igual à corrente nominal. Com este método obtém-se o melhor desempenho do acionamento.

3.3.3.4) Torque Desenvolvido pelo Motor

Para que um motor de passo desenvolva torque, o rotor deve estar desalinhado em relação ao estator, considerando-se um determinado ponto (Fig 3.14). A relação entre o torque desenvolvido e o ângulo de desalinhamento do rotor em relação a uma determinada posição de passos será expressa por:

$$T = T_m \sin k\theta$$

- onde: T- Torque desenvolvido pelo motor
 T_m- Torque máximo
 k- Constante que depende do tipo do motor e sua construção
 θ- Ângulo necessário para desalinhamento do rotor em relação a uma posição.

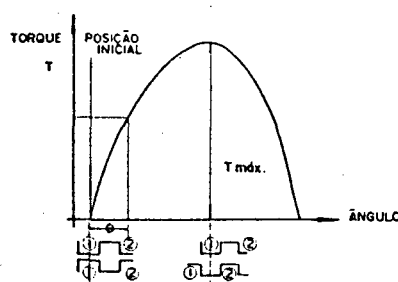


Fig. 3.14- Torque do motor.

O Torque dinâmico é o máximo torque que pode ser desenvolvido por um motor operando em condição dinâmica. Este torque será sempre mais baixo, mesmo à pequenas frequências de passo do que o torque produzido sob condições estáticas. O torque diminui com o aumento da frequência de pulsos aplicados ao motor.

Já a curva de torque x velocidade mostra o comportamento dinâmico de um motor de passo (Fig.3.15). Este comportamento dependerá das inércias das cargas, dos circuitos de alimentação das bobinas, do amortecimento do motor, etc. Com o aumento da velocidade se observa uma redução no torque devido à um aumento das correntes de Foucault que provocam carga adicional ao motor e redução de corrente pela constante

de tempo do circuito indutivo-resistivo das fases. O motor poderá partir em qualquer velocidade sem perda de passo até a curva limite determinada Pull-in. Já a curva Pull-out estabelece o máximo torque dinâmico solicitado pelo motor em malha aberta. As regiões 1 e 3 são denominadas regiões de partida-parada. A região 2 é a região de instabilidade à baixa frequência. O sistema não poderá ser operado nesta região porque a perda de sincronismo é inevitável. Já a operação na região 4 será o objetivo dos sistemas de posicionamento e só será possível quando o motor parte de 1 ou 3 e é acelerado.

Pode-se obter mais informações sobre este item na bibliografia /48//49/.

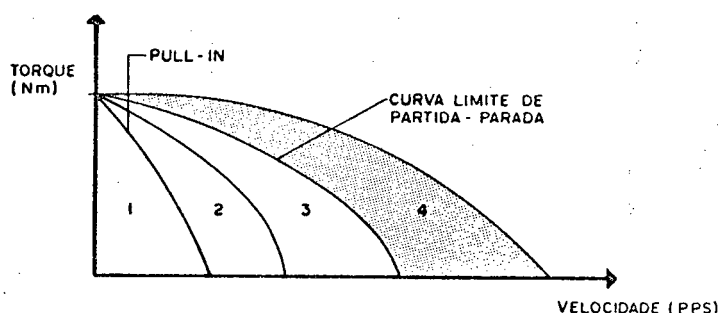


Fig 3.15- Curva Torque x Velocidade

3.3.3.5) Perfis de Velocidade

O desempenho do motor de passo era limitado pela dificuldade de se atingirem velocidades altas com rapidez razoável. Muitos esquemas de controles, as chamadas curvas de aceleração e desaceleração (rampas) foram experimentadas. Os processos de aceleração e desaceleração são indispensáveis por dois motivos: (1) operação na região de alta velocidade do motor e (2) operação de posicionamento de cargas inerciais.

Os perfis mais comumente empregados são: rampa linear; rampa exponencial; rampa exponencial inversa e rampa parabólica.

Rampa linear. - consiste no aumento linear da velocidade a partir da velocidade inicial até a final e redução também linear.

Rampa exponencial. - A velocidade de aceleração obedece a uma equação exponencial crescente e a velocidade de desaceleração a uma equação exponencial decrescente.

Rampa exponencial inversa. - neste processo, a velocidade de aceleração obedece a uma equação exponencial crescente e a velocidade de desaceleração obedece a mesma equação, porém, em sentido contrário, o que elimina problemas de omissão de passos por desaceleração brusca.

como no perfil anterior.

Rampa parabólica.- um recente desenvolvimento usa uma função parabólica para o tempo para aceleração, o que aumenta o torque do motor para uma determinada velocidade em comparação com a Rampa exponencial e exponencial inversa /62/.

3.3.3.6) Amortecimento

Quando se comuta a alimentação de um motor de uma fase para outra, com o objetivo de posicioná-lo de um ângulo de θ_1 para um ângulo de θ_2 a carga acoplada ao eixo não se estabiliza instantaneamente pois o motor adquire energia cinética durante a aceleração e ultrapassa o ângulo θ_2 . Caso não seja amortecido, o rotor só posicionará em θ_2 após um número n de oscilações. Este fenômeno é mais grave nos motores com relutância variável que nos motores híbridos ou de ímã permanente. O tempo de estabilização do rotor poderá ser reduzido utilizando-se técnicas de amortecimento. Os métodos de amortecimento são os seguintes:

-Amortecimento mecânico

Por este método, acoplam-se ao motor dispositivos mecânicos que reduzem a energia cinética, e portanto as oscilações, do rotor por atrito. O aumento do torque total do sistema, a redução do rendimento, o aumento do erro de posicionamento e redução de capacidade de aceleração do motor são algumas restrições do método.

-Amortecimento pelo circuito de alimentação

Pode-se conseguir o amortecimento reduzindo-se o tempo de descarga de corrente na fase energizada pela melhoria do circuito de extinção de corrente ou pela alimentação de um maior número de fases de uma vez. O método é melhor explicado na bibliografia /48/.

-Amortecimento eletrônico

Transfere-se o controle de amortecimento neste método de soluções em hardware por uma estratégia de controle em software nos sistemas controlados por microcomputadores. Existem duas técnicas, que são:

Controle tipo Bang-bang, no qual a unidade de controle comanda o motor estabelecendo um tempo t_1 para o último passo. Decorrido um tempo t_2 , t_2 entre t_0 e t_1 , as fases que provocam a rotação em sentido oposto são acionadas. Dissipa-se assim a energia cinética do último passo devido ao torque negativo do torque inverso. Após um tempo t_3 (t_3 entre t_0 e t_1 e após t_2) é dado um passo no sentido desejado e o rotor é posicionado no ponto correto /7/.

Retardo da comutação. - Utiliza-se o torque negativo produzido no penúltimo passo para reduzir o torque fornecido ao último passo, que garante a redução da energia cinética responsável pelas oscilações.

-Amortecimento pelo projeto do motor.

A técnica comumente consiste na inclusão de enrolamentos adicionais e modificações na geometria dos dentes do rotor e estator, descritas na bibliografia /48/.

3.4) Sensores

Muitas vezes em equipamentos mecânicos necessita-se transformar grandezas físicas como velocidade, percurso, etc, em sinais elétricos que podem ser medidos para fornecer características físicas correspondentes. Isto pode ser feito utilizando-se transdutores. Especificamente nos posicionadores necessita-se sensoriar a corrente e a velocidade de um servomotor além da posição da mesa de trabalho. Para tanto são utilizados basicamente três tipos de transdutores que são:

-Transdutores ópticos: Que operam por interrupção da luz. Os deslocamentos nestes sensores podem ser traduzidos em saída digital sem uso de conversores A/D.

-Transdutores Indutivos: Seu funcionamento baseia-se na variação da indutância de uma bobina ou a mútua indutância entre duas bobinas.

-Transdutores Resistivos: Consiste em essência de um elemento resistivo e um contacto móvel, e é muito eficiente.

Os controles de posição, velocidade e corrente do servomotor são feitos quando o sistema trabalha em malha fechada. Para sistemas em malha aberta os sensores são usados somente para delimitar a área de trabalho e evitar o choque da mesa do posicionador no fim do curso. Pode-se utilizar neste caso os sensores do tipo optoeletrônico da Fig. 3.16. Maiores informações sobre sensores podem ser obtidas nas bibliografias /2/, /4/, /56/ e /63/.

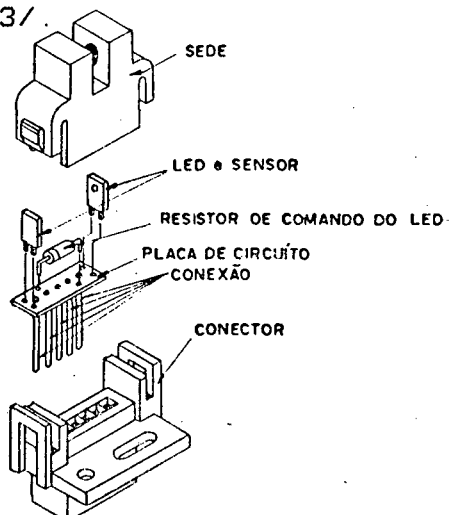


Fig 3.16- Sensor optoeletrônico com diodo emissor

3.5) Movimento de Corte e Movimento de Avanço

As máquinas operatrizes são agrupadas em 2 grandes categorias, segundo o tipo de operação executada, que são as de usinagem e conformação, das quais nos interessa observar somente as de usinagem. "As operações de usinagem são aquelas que ao conferir à peça dimensão, forma, acabamento ou uma combinação qualquer destes três itens produzem cavaco"/27/. Os movimentos observados na usinagem são relativos entre a peça e a aresta de corte, sendo que alguns destes causam a saída do cavaco e outros não. No caso das furadeiras o movimento que origina retirada de cavaco é o movimento efetivo de corte que é resultante dos movimentos de corte, executado pelo giro do fuso (cabecote) e movimento de avanço que é o movimento entre peça e ferramenta.

O fuso poderá ser motorizado para furação de PCIs por ex. de duas formas: através de servomotor de CA ou por turbina à ar comprimido. No caso da motorização por motor CA são utilizados preferencialmente motores assíncronos trifásicos. Para se gerar corrente alternada de alta frequência, transforma-se a corrente alternada da rede em corrente contínua, e novamente em corrente alternada com a frequência desejada. Um exemplo de circuito conversor é o que dispensa o uso de resistores e utiliza as chaves liga desliga, por chaves de dois pólos, podendo ser substituídas por semicondutores operando em chaveamento (tiristores e transistores). Este tipo de acionamento tornou-se atrativo pela construção de motores pequenos de elevado torque, circuitos de controle bastante precisos permitindo que se atinjam velocidades de até 100000 rpm. Nestes fusos o torque será relativamente constante mas a potência varia inversamente em relação ao número de rotações por minuto, o que é inadequado pois a potência adicional será necessária para velocidades mais lentas utilizadas para furação de diâmetros maiores. Por isto há necessidade de uma boa regulagem do conversor para se evitar problemas na execução de furos de grande diâmetro. No segundo tipo de motorização são utilizados turbinas tipo impulso onde a energia do ar aciona o volante da turbina. Este tipo de acionamento possui uma ótima relação peso/potência, funcionamento isento de vibrações e uma alta velocidade periférica. Apesar disto o custo do sistema de compressor de ar, secador de ar e custos adicionais encarecem em muito o preço final da furadeira.

Como mancais para estes fusos poderão ser utilizados tanto os mancais à ar comprimido quanto os mancais com rolamentos de esferas. Com fusos de mancal à ar comprimido podem-se atingir velocidades de até 110.000 rpm com menor índice de "runout" que dos fusos com rolamentos de esferas. Os mancais com rolamentos de esferas são mais utilizados para velocidades baixas, (abaixo de 40.000

rpm), pois são mais confiáveis e menos dispendiosos. A seguir são listadas as seis categorias básicas de fusos encontradas no mercado segundo tipo de mancal, operação executada e velocidade máxima em rpm:

TIPO	RPM MÁXIMO
Mancal a ar para furação	110000
Rolamento de esferas para furação	80000
Mancal a ar para furação e contorneamento	80000
Rolamento de esferas para furação e contorneamento	60000
Rolamento de esferas para contorneamento e furação	40000
Rolamento de esferas para contorneamento	24000

O movimento de avanço poderá ser executado através de posicionadores utilizando motores e acionamentos, elementos mecânicos e sensores listados neste capítulo ou pistões de movimentação linear utilizando como fluido o ar comprimido, sendo utilizados principalmente em conjunto com fusos com mesmo tipo de acionamento já que pode-se aproveitar o sistema de compressão do ar.

Mais informações sobre estes itens poderão ser encontradas nas bibliografias/34//33//61//67/.

CAPÍTULO IV

PROJETO EXECUÇÃO E MONTAGEM DOS SISTEMAS MECÂNICO E ELETRÔNICO UTILIZADOS EM UMA FURADEIRA COM COMANDO NUMÉRICO PARA PCIs

4.1.- Introdução

Uma furadeira para PCIs com comando numérico é uma Máquina-Ferramenta composta por 3 mecânicas, que se deslocam independentemente umas das outras, segundo os eixos cartesianos X,Y e Z.

São listadas à seguir as principais especificações para o desenvolvimento da Furadeira para PCIs:

(1) Simplicidade e robustez mecânicas evitando custos adicionais de instalação com fiações elétricas próprias estabilizadores de tensão e reforços de pisos, requisitos relativamente comuns em Máquinas-ferramenta.

(2) Dimensões reduzidas com área útil de furação de 500x300mm permitindo furação de uma grande gama de placas.

(3) Cabeçote único de furação simplificando o projeto mecânico e eletrônica de controle/acionamento.

(4) Capacidade de furar simultaneamente cinco placas empilhadas sob a forma de "sandwich" elevando a produtividade.

(5) Velocidade da furadeira de 60.000 rpm permitindo furação dos diâmetros mais utilizados para padrões nacionais (até 0,5mm) e contorneamento de placas.

(6) Resolução de posicionamento de 20 μ m.

(7) Posicionadores comandados em malha aberta simplificando e reduzindo os custos dos circuitos de acionamento e controle.

(8) Permitir implementação futura de troca automática de ferramentas.

(9) Possuir comando numérico computadorizado baseado em microcomputador PC capaz de ser programado com comandos padrões empregados pelas indústrias fabricantes de PCIs.

(10) Possibilitar sua integração com sistemas de projeto auxiliado por computador (CAD) aplicados ao projeto de placas. O protótipo deve permitir a leitura e execução de programas gerados pelo CAD.

(11) Permitir a integração com sistemas digitalizadores (mesa digitalizadora) para programação de PCIs sobre o fotolito.

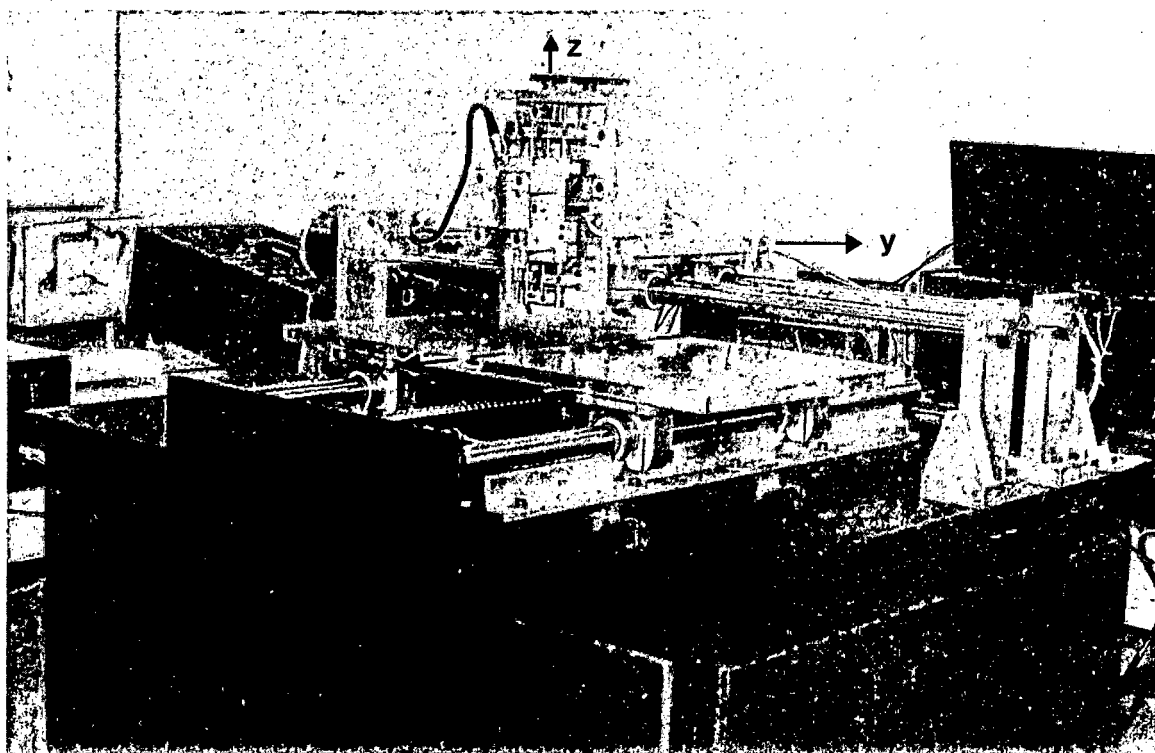


Fig. 4.1.- Foto da mesa desenvolvida.

Busca-se neste capítulo analisar cada um dos componentes efetivamente utilizados na construção dos posicionadores da mesa, bem como a estrutura de sustentação e o dimensionamento dos motores envolvidos na construção.

4.2.- Dimensões da Mesa de coordenadas X,Y e Z.

Depois de um estudo junto à diversos fabricantes de placas de circuito impresso, verificou-se que existe no mercado nacional uma demanda por furadeiras para PCIs de pequeno e médio porte. Foi feito então um estudo das PCIs mais utilizadas no Brasil, e das máquinas de pequeno e médio porte importadas. Os resultados estão colocados a seguir:

Placas de Circuito Impresso

100 x 160	[mm]	(Padrão EuroCard)
180 x 290	[mm]	(Padrão MultiBus)
160 x 233,4	[mm]	(Padrão Eurocard Duplo)

Máquinas no Mercado Internacional

EXCELLON EX200L	371	x	662	[mm]
EXCELLON EX110	508	x	610	[mm]
OZO	304,8	x	457,2	[mm]
MICROMAT	280	x	550	[mm]
MICRONIC SUPER 1	630	x	630	[mm]

Em função dos dados acima colocados, optou-se por uma construção pequena o bastante para que se reduzissem os custos de fabricação, mas com capacidade suficiente para furação de PCIs de interesse industrial. Com isto, buscou-se uma área de corte com dimensões semelhantes àquela encontrada na máquina OZO, que foi a máquina, considerada pelos fabricantes nacionais a mais adequada para nossas necessidades. A área de furação da máquina ficou sendo então de 305 x 500 mm, não se computando a área livre para colocação do magazine para troca de ferramentas.

Deve-se observar que máquinas tais como a que foi desenvolvida, são indicadas não só para indústrias pequenas e médias, que desejem automatizar seu processo de furação, como também às indústrias de grande porte, que seguidamente modificam o desenho de suas placas e não podem utilizar uma máquina de grandes dimensões e com muitos cabeçotes para execução de protótipos, cada vez que for executada uma mudança no programa de uma determinada placa.

Com as dimensões da área de corte desejada, optou-se por um dos dois tipos construtivos em relação à estrutura da máquina. Deve-se lembrar que a estabilidade é um dado muito importante, quando se trata de furações, onde se utilizam brocas de pequeno diâmetro/69//63/.

Existem basicamente dois tipos construtivos possíveis para as furadeiras para placas de circuito impresso com relação às mecânicas X e Y, que serão responsáveis pelo posicionamento do centro da broca sobre o ponto desejado para a furação: O primeiro visa a integração das duas mecânicas (X e Y), onde uma das mecânicas carrega a outra sobre si (técnica de portal fixo) e o segundo, que procura separar as mecânicas X e Y fazendo com que as mesmas tenham movimentos independentes (técnica de portal móvel) (Fig. 4.2).

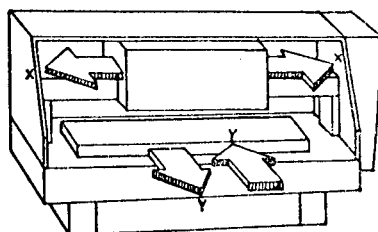


Fig.4.2.- Mesa com os movimentos X e Y independentes(técnica de portal móvel).

No primeiro tipo, qualquer movimento em uma das mecânicas causará problemas de estabilidade na outra, principalmente quando o acionamento é feito através de motores de passo. O motor de passo, como se sabe, possui uma característica de oscilação quando desligado. Se este movimento não for amortecido, comprometerá, além da mecânica que está sendo posicionada, a outra que estaria parada. Outro problema seria com relação às dimensões da base da máquina que, neste caso, teriam de ser aumentadas para que se obtivesse as dimensões da área de corte desejada. Este tipo construtivo pode ser utilizado em mesas de grande dimensões, onde as desvantagens da utilização da técnica de portal fixo serão compensadas com soluções mecânicas de maior custo, tais como a utilização de sistemas de guias aerostáticas que tornam os movimentos de mesas com massa elevada bastante suaves. A grande vantagem deste tipo construtivo é o fato de que o cabeçote de furação ficará fixo em uma posição, permitindo a utilização de sistemas de avanço mais potentes, o que poderá aumentar o número de furos possíveis de serem executados por minuto.

Já o segundo tipo construtivo em que as mecânicas são separadas é o indicado para mesas de menor porte que utilizam, como sistema deslizante, as guias lineares. Possui a vantagem de dar uma estabilidade estrutural bem maior à máquina (pelo fato das mecânicas executarem movimentos independentes), além de reduzir as dimensões da base sobre a qual todo o conjunto mecânico será apoiado, e que ficaram reduzidas, neste caso, à 725 x 835mm, dimensões estas, menores do que as necessárias para atingir-se a mesma área de corte, utilizando-se o primeiro tipo construtivo. Além disto, neste desenvolvimento, esta divisão física entre as duas mecânicas permitiu a utilização de motores de passo de mesma potência, o que veio a facilitar em muito o desenvolvimento da eletrônica de acionamento/controle.

Com estas dimensões escolhidas, passaremos agora ao relato das partes componentes da máquina.

4.3.- Base da Máquina

Havia a opção de utilização de quatro tipos de material para a execução desta base: ferro fundido cinzento, aço, alumínio e granito. Nossa opção acabou sendo pelo Granito Preto devido à grande rigidez mecânica verificada no granito no que diz respeito às variações térmicas, que não é obtida em nenhum destes outros materiais. Esta é uma característica muito vantajosa, tendo-se em mente que as dilatações e contrações térmicas podem provocar o desalinhamento entre guias, que dificultarão a movimentação das mesas da Máquina Operatriz. Pode-se obter excelente rigidez mecânica também

com o concreto mas outras características tais como a impossibilidade de usinagem para plainamento e polimento da superfície impedem sua utilização neste caso. A inexistência de corrosão da pedra por oxidação que por este motivo não necessita de nenhum tratamento sobre ela após a usinagem e a obtenção de superfícies planas, polidas e estáveis são outras características vantajosas na utilização do granito em relação ao ferro fundido cinzento e ao aço, que necessitam tratamentos posteriores à usinagem.

Finalmente, o custo da base foi muito importante em nossa escolha. A existência de Indústrias fabricantes de Furadeiras para PCIs na região, permitiu o barateamento das bases de granito, em relação aos outros materiais, além de aumentar a qualidade do produto fornecido.

A placa de granito utilizada possui uma espessura de 35 mm, e foi cortada utilizando-se um disco de corte diamantado. Esta espessura foi escolhida para o protótipo, tendo em vista o elevado número de furações sobre a base, e a dificuldade de fixação precisa através de parafusos, caso a mesma tivesse maior espessura. As furações sobre a placa foram feitas utilizando-se uma máscara de furação e brocas diamantadas com diâmetros de 8, 10 e 12 mm. A utilização tanto de brocas como de serras diamantadas visou a obtenção de superfícies de melhor qualidade, tendo-se em vista a difícil usinabilidade do material, que possui elevada dureza, e alta fragilidade com relação aos choques.

A usinagem das superfícies de apoio inferior e superior foi feita utilizando-se um rebolo copo de carbureto de silício acoplado a uma Plaina Fresadora de Grandes dimensões. Para o acabamento final foi utilizado um rebolo tipo copo, impregnado de diamante. A massa total do bloco após as usinagens atingiu cerca de 60 kg.

4.4.- Estrutura de Sustentação

Depois da escolha do material da base e da sua confecção, foi necessária a execução de uma estrutura de chapas de aço que, parafusada abaixo da superfície de granito, permitiu a colocação dos apoios para sustentação de todo o conjunto.

A colocação dos apoios diretamente sobre a superfície de granito não é indicada, tendo em vista a fragilidade do material quando a ele são aplicados esforços.

Esta concepção de estrutura visa o transporte fácil de todo o conjunto, permitindo sua utilização nas mais diversas bancadas, juntamente com o computador e o sistema eletrônico (Fig.4.1).

Isto acabou não sendo interessante à nível de protótipo, devido ao peso total do conjunto, e vibrações provocadas pelos motores, para as quais as bancadas não haviam sido projetadas. Desta forma, partindo-se do quadro de aço inicialmente construído, foi

confeccionada uma estrutura de sustentação para todo o conjunto. Para isto, foram utilizados perfis em L de aço 1020 com dimensões de 50,8 x 50,8 mm e espessura de 6,35 mm, iguais aos utilizados para a confecção do quadro.

A estrutura inicial é composta destes perfis soldados, formando um retângulo com as dimensões externas iguais às dimensões da base de granito.

Outros perfis de reforço foram soldados unindo os lados deste retângulo, exatamente nas partes médias, formando desta forma uma cruz. Outro retângulo de perfis foi construído possuindo as dimensões de 800 x 910 mm. Aos vértices dos retângulos foram soldados quatro perfis de aço fazendo a união desses retângulos, formando a estrutura de sustentação da base em forma de um tronco de pirâmide de base retangular. Além disto, foram soldados perfis de reforço, em cada uma das faces da estrutura, unindo as partes medianas dos lados do retângulo menor (superior) com os vértices do retângulo maior (inferior).

Apesar da utilização de perfis abertos em L, obteve-se uma elevada rigidez estrutural comprovada com o funcionamento da mesa na conclusão do trabalho.

Com o objetivo ainda de minimizar algum problema oriundo das vibrações transmitidas pela estrutura, foram utilizados 4 suportes (bases) de apoio do conjunto. Com estas bases, também se permite o nivelamento de todo o conjunto sobre o piso. Cada uma das bases é composta de um parafuso de regulagem de altura, um disco de aço e um apoio de borracha. Ficam as mesmas parafusadas sobre o retângulo inferior.

A altura total do conjunto, contando com a base de granito e os suportes, ficou sendo de 840 mm com regulagem mínima e de 860 mm com regulagem máxima. Isto, do ponto de vista ergonômico, é bastante interessante, já que a altura ótima para trabalhos de grande precisão varia entre 840 e 1000 mm /8/. Deve-se observar que os trabalhos manuais executados na confecção das placas de circuito impresso serão basicamente a fixação das placas sobre a base da mecânica X da mesa, e possivelmente, a troca de ferramentas do cabeçote da mecânica Z, trabalhos estes, que ficaram situados dentro da faixa de altura indicada acima.

Ainda na estrutura mecânica foram executados suportes, que sustentarão a eletrônica desenvolvida, e as conexões do vácuo utilizado para resfriamento da broca e retirada de cavaco.

4.5.- Desenvolvimento das Mecânicas X e Y da Furadeira

Depois de se ter feito a opção pela utilização do sistema do tipo pórtico móvel, parte-se então para o dimensionamento das

referidas mecânicas. Uma das vantagens do sistema com mecânicas independentes, é a de que pode-se tentar projetar as duas mecânicas com massas semelhantes, e buscou-se o aproveitamento desta. Primeiramente, procura-se dimensionar a mecânica X da qual já se sabe o tamanho da mesa que suportará as placas de circuito impresso, que é de 300 x 500 mm. Supondo uma mesa de 300 x 500 mm e com 15 mm de espessura, necessários para o sistema de fixação das PCIs, feita de aço, tem-se uma massa de aproximadamente 18 kg, só para a mesa. Por esse motivo, e também pelo fato de que o aço necessita de algum tratamento anti-corrosivo para resistir à oxidação, decidiu-se pela utilização do alumínio, o que veio facilitar em muito o trabalho, além de reduzir sobremaneira o peso do conjunto. A partir desse momento, colocou-se portanto o alumínio como o material a ser utilizado no sistema estrutural da mesa, sempre que possível.

Explica-se, agora, cada uma das partes principais das duas mecânicas, que são: mesa, guia, sistema de transmissão, acoplamento e motor, e também procura-se mostrar para as mecânicas X e Y um cálculo estático que despreza esforços impulsivos de corte mostrando um simples roteiro para dimensionamento prévio da mecânica de um posicionador.

4.5.1.- Mesa X e Y

A mesa de coordenadas da mecânica X possui as dimensões de 300 x 500 mm com 15 mm de espessura realizada em alumínio. O sistema de fixação das placas vem a ser um canal em T usinado sobre o alumínio e, internamente a este canal, é introduzido uma peça de borracha macia, também em forma de T com furos centrais (Fig. 4.3).

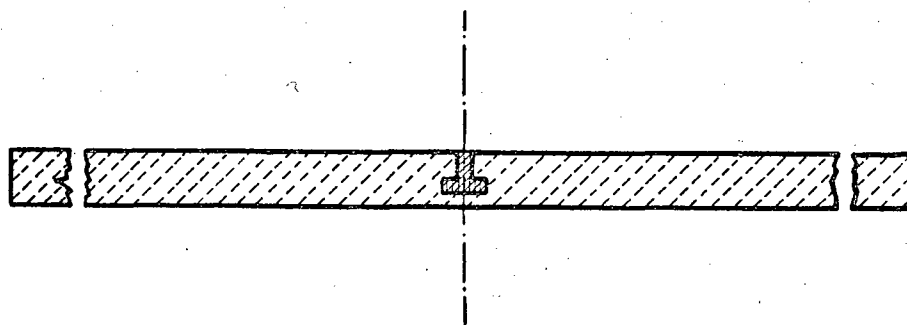


Fig.4.3.- Sistema de fixação das placas de PCIs

Através da colocação de pinos de aço nas placas, pode-se então fixá-las manualmente sobre a base. Para que o trabalho seja efetuado de maneira rápida, o operador terá sobre a mesa uma marcação do tipo fim de curso, que permitirá a troca rápida do conjunto de

placas furado. Além disto, este sistema de fixação permitirá, no futuro, a alimentação através da colocação de "pallets" de furação inclusive com o auxílio de Robot.

Para mesa da mecânica Y foi também utilizado alumínio como material estrutural e a mesma possui as medidas de 200 x 200 mm necessárias à fixação do cabeçote da mecânica Z e dos suportes para as buchas do sistema de guias. A espessura escolhida foi também de 15 mm. Com isso, o deslocamento total da mecânica Y ou o comprimento útil das guias, deverá ser de 700 mm.

Já o comprimento útil das guias da mecânica X deverá ser de 650 mm, contando com o dispositivo para fixação das brocas para troca automática de ferramentas, a ser desenvolvido no futuro.

4.5.2.- Sistema de Guias

No desenvolvimento da furadeira para placas de circuito impresso, procurou-se alternativas para construção das peças, que pudessem ser executadas no CEFET-PR.

Foi escolhido como tecnologia para guias as "buchas lineares", que são rolamentos lineares cilíndricos, utilizados preferencialmente em máquinas operatrizes leves, tais como furadeiras para PCIs.

As buchas lineares carregam carga sobre o seu comprimento rolando sobre uma guia cilíndrica, sendo a carga transmitida da bucha para a guia.

A causa primordial para redução na capacidade de carga dos rolamentos lineares bem como para perda de precisão de funcionamento dos mesmos, é a utilização de guias com dureza inadequada. A dureza nestas, para que o rolamento possa ser utilizado com 100% da sua capacidade de carga nominal, deve ser de no mínimo 60 HRC. Além disso, a guia deverá ter uma camada com profundidade de 1,0 à 2,5 mm com esta dureza /15//17/.

A vida do rolamento linear em um sistema de guias lineares tem uma relação direta com o cubo da dureza da pista interna, que no caso vem a ser a superfície da guia. Por isso, deve ser evitada a utilização de durezas abaixo da relatada. Além disso, o grau de acabamento superficial da guia deve ser bastante elevado, da ordem de 0,4 a 0,6 um Rt. Este acabamento de superfície tem uma influência direta sobre a vida dos rolamentos, e também sobre o coeficiente de fricção obtido.

A ovalização da guia também deve observar tolerância bastante apertada, devendo ser de ± 0.005 mm e a variação do diâmetro total jamais deverá ultrapassar os valores de 0,013 mm, para mais ou para menos, sob pena de se perder as boas características de precisão e funcionamento do sistema.

O desvio de retilineidade da guia também não deverá ser maior que 0,02 mm por 500 mm de comprimento.

Foi pois utilizado, para a confecção destas, um aço especial VC-52 /22/, igual ao SAE/ABNT52100. Este aço possui a seguinte composição química e é utilizado para roletes, esferas e capas de rolamento, bem como para peças com resistência à abrasão (Tab 4.1):

C	Mn	Cr	Ni	Mo	outros
1,05	0,35	1,45	----	----	-----

Tab.4.1- Composição química do aço VC-52

Estas guias foram usinadas em tórno, retificadas e posteriormente temperadas, recozidas e normalizadas em forno de indução, seguindo a tabela 4.2 :

Recozimento °C	Normalização °C	Têmpera °C	Meio
775 - 800	870 - 900	800 - 830	água
730 - 790	---	830 - 860	óleo

Tab.4.2- Temperaturas de recozimento, normalização e têmpera do aço VC-52

Posteriormente, as guias foram novamente retificadas em uma retífica de precisão, observando-se as características anteriores. Poderia também ser utilizado para acabamento superficial da guia o cromo duro, que vem a ser um depósito de cromo em uma espessura maior que 0,025 mm. Este tipo de acabamento é indicado para peças que necessitem de alta resistência ao desgaste, além de serem muito resistentes à corrosão/68/.

Para que se obtenham superfícies com características necessárias para utilização em conjunto com rolamentos lineares, é necessário que a guia seja previamente usinada, sendo após submetida a um tratamento de cromo duro, e então novamente retificada. Com isso se obtém uma superfície com material mais dúctil internamente, e uma superfície de material mais duro externamente.

Apesar disto, a dureza encontrada no revestimento de cromo

duro foi de 50 a 54 HRC, reduzindo consideravelmente a capacidade de carga, e a vida do rolamento linear, tendo levado à não utilização deste tipo de material para esta aplicação.

Escolhido o material a ser utilizado nas guias, passa-se ao dimensionamento do diâmetro das mesmas, para colocação dos rolamentos lineares. Para aplicações destas guias em máquinas de precisão, há um limite máximo para o ângulo de inclinação nas guias verificados sob carga.

Partindo-se da premissa de que as duas guias podem possuir massas bastante semelhantes, através de um cálculo aproximado, chega-se à conclusão de que a massa de cada um dos carros, que serão apoiados sobre as guias, deverá ser de aproximadamente 11 kg, com carregamento de 5 placas padrão EUROCARD.

Supondo que esta carga seja distribuída em 4 mancais sobre o eixo y, com 75% da carga sobre um dos dois mancais e 25% de carga sobre os outros dois, tem-se uma força sobre cada um dos mancais de 4,12 kgf ou 40,5 N, no caso de maior carregamento.

Segundo o caso de carga descrito acima, e supondo a guia engastada em dois pontos, com comprimento máximo de 700mm e distância entre as duas reações de apoio de 200 mm, tem-se:

$$f_1 = \frac{F \cdot a^3}{6 \cdot E \cdot J} \cdot \left(2 \cdot \frac{3 \cdot 2}{e} \right) \quad \text{Diagrama de uma viga engastada em ambos os extremos com uma carga pontual F no centro. O comprimento total é l, a distância dos pontos de engastamento até o centro é b, e a distância dos pontos de engastamento até as extremidades é a. A deflexão no centro é f_1 e a deflexão nas extremidades é f_m. (4.1)}$$

$$f_{m1} = \frac{F \cdot a^2}{24 \cdot E \cdot J} \cdot \left(3 \cdot l - 4 \cdot a \right) \quad (4.2)$$

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (4.3)$$

$$E = 206000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{tg} \alpha (= x = a) = \frac{F \cdot a^2 \cdot b}{2 \cdot E \cdot J \cdot l} = \frac{40,5 \cdot (250)^2 \cdot 200}{2 \cdot 206000 \cdot \frac{\pi \cdot (d)^4}{64} \cdot 700}$$

$$d^4 = \frac{40,5 \cdot 64 \cdot (250)^2 \cdot 200}{2 \cdot 206000 \cdot \pi \cdot 700 \cdot \text{tg} \alpha} = \frac{3,24 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 206000 \cdot \pi \cdot 700 \cdot \text{tg} \alpha}$$

$$d^4 = \frac{35,76}{\text{tg} \alpha} = 14,32$$

Segundo a tabela 4.3 abaixo, verifica-se que, de acordo com o diâmetro da guia, os valores máximos para as tangentes do ângulo formado/17/:

Diâmetro do Eixo	Valor máximo da tangente de alfa
1/2	0,00091
3/4	0,00085
1	0,00072
1 1/4	0,00067
1 1/2	0,00064
2	0,00060

Tab.4.3- Valores máximos da tangente do ângulo de inclinação da guia sob carga segundo seu diâmetro

Substituindo os valores da tabela na fórmula, constata-se que será possível somente a utilização de diâmetros acima de 12,7 mm para as guias. Optou-se pela guia de 25,4 mm, que trás maior segurança quanto às vibrações provocadas sobre as guias, além de possibilitar um carregamento um pouco maior sobre a mecânica Y, permitindo a colocação de outros equipamentos tais como por exemplo outro cabeçote de furação, motores para troca automática de ferramentas, etc. Mesmo sendo as outras guias menos solicitadas, optou-se pela padronização do diâmetro de uma polegada (25,4 mm), por tornar mais fácil a fabricação das peças para a furadeira, além de facilitar a aquisição dos rolamentos lineares, e possíveis substituições de peças, em caso de manutenção.

Havendo um cruzamento das mecânicas X e Y, uma das duas mecânicas, no caso a mecânica Y, deverá ser somente apoiada sobre os dois extremos das guias. No caso da mecânica X, o apoio da guia poderá ser feito sobre toda sua extensão.

Assim, as guias foram fixadas sobre a base destas duas formas distintas. A mecânica y teve sua fixação feita por apoios nos dois extremos ou suportes perimetrais, sendo que um conjunto de suportes que mantém a distância entre a furação e a colocação das guias fixas, sendo formado por uma placa única (fig. 4.4) e o outro conjunto permitindo regulagem nesta distância, possibilitando uma maior facilidade de montagem(Fig. 4.5).

Este suporte foi construído de alumínio, e o aperto das guias se dá através de parafusos, fechando um canal aberto no sentido perpendicular à linha de centro das guias (Figs. 4.4 D e 4.5 A).

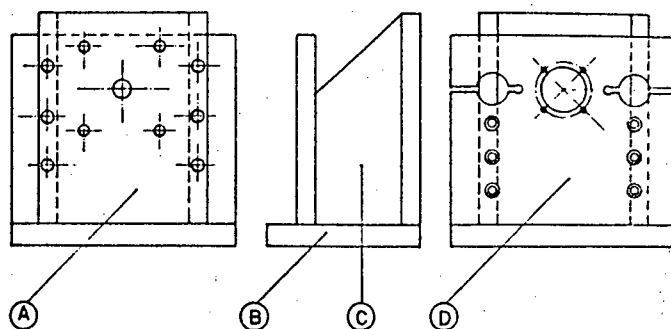


Fig. 4.4.- Suportes perimetrais de apoio das guias da mecânica Y
(Placa Única)

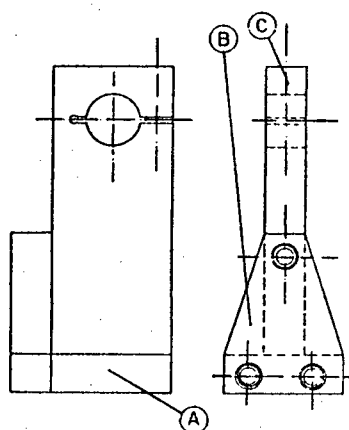


Fig. 4.5- Suportes perimetrais de apoio das guias da mecânica Y
(Placas Individuais)

Para a mecânica X, por sua vez, foram construídos suportes contínuos usinados de uma barra de duralumínio, com um perfil em forma de T invertido (Fig. 4.6). É feito um canal em V central à peça que permite o encaixe da guia sobre o suporte de maneira contínua. A fixação é feita através de parafusos colocados pela parte inferior da peça, permitindo a união da guia com o suporte, formando um conjunto. Para tanto, é necessária também a execução de furações com rosca sobre a guia, permitindo, desta forma, a colocação dos parafusos (Fig. 4.6.A).

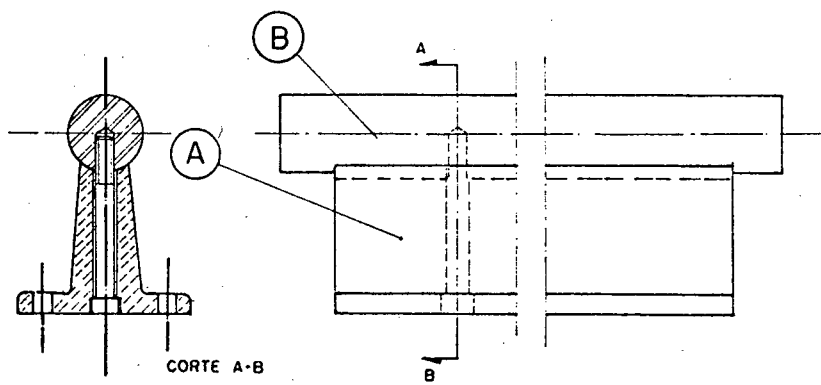


Fig 4.6- Suporte da guia em toda sua extensão

Foram utilizados rolamentos lineares de precisão, abertos para a mecânica X, (Fig 4.7A), e rolamentos lineares de precisão, fechados, para a mecânica Y (Fig 4.7B). Como união entre os rolamentos lineares de precisão e a mesa foram desenvolvidos e construídos mancais de liga de alumínio fundido com teor de 4,5% de cobre, usinados em centro de usinagem.

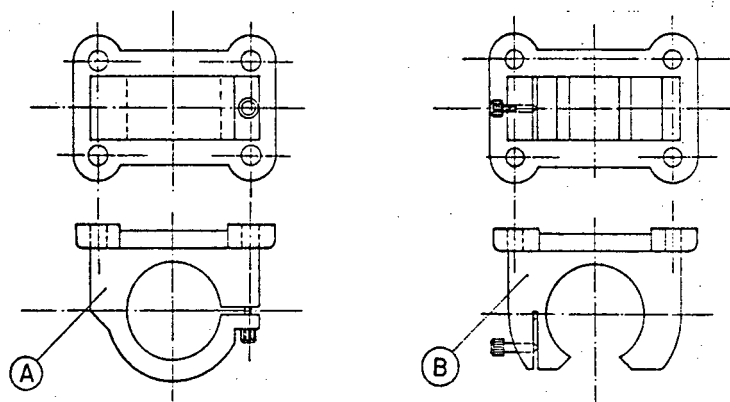


Fig. 4.7.- Mancais para as buchas lineares, mecânicas X e Y.

Estes mancais foram construídos segundo as necessidades de cada um dos dois casos, e possuem, cada qual um sistema de regulação da pressão exercida pelo mancal sobre o rolamento linear, já que estes são do tipo ajustável. Além disso, cada um dos mancais possui a furação, para a fixação entre o mancal e a mesas, alargada, no sentido transversal de forma a permitir a regulação do mancal na hora da montagem da mesa. Cada um dos rolamentos lineares fechados possui uma capacidade de carga de 1820 N, e os rolamentos lineares abertos de 1330 N /17/.

4.5.3.- Sistema de Transmissão

As furadeiras para placas de circuito impresso com Comando Numérico Computadorizado podem, ter alguns tipos de transmissão: através de fusos de esferas recirculantes, através de correias dentadas e através de cabos de aço. A necessidade de precisão para a furadeira é de um desvio médio de deslocamento de $E = \pm 0,050\text{mm}$ pelo deslocamento total de cada um dos eixos. Sabe-se, /6//33/, que este desvio médio de deslocamento não é possível de ser alcançado com a utilização de correias dentadas ou cabo de aço. Sendo assim, optou-se pela utilização dos fusos de esferas recirculantes, como sistema de transmissão, entre os motores das duas mecânicas e a mesa que será posicionada. Como visto no item 4.1, a mesa é posicionada por um sistema de malha aberta, portanto, a escolha adequada do sistema de transmissão é de suma importância, pois não há sensoramento de posição, e assim, a precisão depende de seus elementos mecânicos, dos

motores e acionamentos como visto no item 3.2.2.2. Os fusos de esferas recirculantes, aumentam em muito a confiabilidade das máquinas operatrizes, e desempenham um papel semelhante ao do fuso convencional, com algumas peculiaridades /15//50/.

Para se proceder a seleção dos fusos de esferas necessários para as duas mecânicas, supõe-se novamente que estas possuem massas iguais com cerca de 11kg. Além disso, o deslocamento útil da mecânica X será de 350mm e o deslocamento útil da mecânica Y será de 500mm.

Os motores que acionarão estas, por sua vez, são do tipo passo-a-passo e, para este tipo de motor, pode-se considerar uma velocidade de funcionamento da ordem de 650 rotações por minuto.

A velocidade linear máxima desejada será de 2500 mm por minuto, velocidade encontrada em outras mesas da mesma categoria. Sendo assim, selecionou-se o passo que será:

$$P \geq \frac{V_{\text{máx.}}}{N_{\text{máx.}}} = \frac{2500 \text{ [mm/min]}}{650 \text{ [rot/min]}} \geq 3,84 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Optou-se então por um passo de 4mm para os fusos destas duas mecânicas. Com isso, utilizando-se um motor de 200 passos por volta, consegue-se uma resolução de 0,02 mm com o acionamento funcionando em sistema de passo completo, e de 0,01 mm com o acionamento funcionando em sistema de meio passo.

Para seleção do comprimento dos fusos, tem-se que:

Comprimento total = comprimento + comprimento + comprimento para
de trabalho útil da castanha margem nas pontas

para a mecânica X:

$$\text{Comp}_X = 350 + 50 + 70 = 470 \text{ mm}$$

para a mecânica Y:

$$\text{Comp}_Y = 500 + 50 + 70 = 620 \text{ mm}$$

Tendo os dois comprimentos úteis máximos, pode-se então fazer a escolha do diâmetro central dos fusos. Para a mecânica X, onde é utilizado um sistema de fixação "livre" em uma das pontas, o diâmetro deverá ser maior ou igual a:

$$d_r \geq \frac{N \cdot L}{f} \cdot 10^{-7} \text{ [mm]} \quad (4.5)$$

sendo L = comprimento útil máximo;

f = coeficiente determinado pelo sistema de montagem do fuso
(tabela 4.4)

N = rotação do fuso

Nº	Tipo de montagem	f
1	suportado-suportado	9,7
2	fixo-suportado	15,1
3	fixo-fixo	21,9
4	fixo-livre	3,4

Tab 4.4- Coeficiente determinado pelo sistema de montagem do fuso

$$d_r \geq \frac{650 \cdot (470)^2}{3,4} \cdot 10^{-7}$$

$$d_r \geq 4,22 \text{ mm.}$$

Na mecânica Y, apesar do comprimento entre pontas ser maior que o da mecânica X, o sistema de fixação do tipo "fixo-suportado", permite a utilização de diâmetros menores.

OBS.- Considera-se suportada uma montagem que utiliza um rolamento de contato angular e um rolamento radial, ou um rolamento de contato angular em cada extremo; e fixa, uma montagem com dois rolamentos de contato angular de um dos lados /15/.

O diâmetro central do fuso deverá ser menor que:

$$d_m \leq \frac{70000}{N} \quad \text{para máquinas de precisão}$$

$$d_m \leq 107,6 \text{ mm.}$$

Pode-se fazer uma seleção prévia para o fuso, observando-se os diâmetros mínimo e máximo encontrados, e sabendo-se os graus de precisão necessários para o conjunto. Sendo assim, para a classe C5 tem-se:

Grau de precisão dos fusos

Eixo X	Eixo Y
E = +/- 0,027 mm/500mm	E = +/- 0,030 mm/630mm
e = +/- 0,020 mm	e = +/- 0,023 mm
Repetibilidade = +/- 0,010mm	Repetibilidade = 0,010mm

Optou-se, então, por dois fusos de 14mm de diâmetro com 4mm de passo e comprimentos úteis totais de 489 e 689 mm, retificados com castanhas simples da classe T.

O diâmetro de 14mm supera em muito aquele necessário para a transmissão, mas os fusos nacionais só eram encontrados com diâmetros mínimos acima deste, e, para os comprimentos necessários, as firmas estrangeiras só forneciam fusos especiais fora dos padrões de catálogo, o que teria aumentado, em muito, os custos de fabricação do protótipo da furadeira.

Pode-se fazer alguns cálculos necessários para verificação da validade de utilização desses dois fusos de esferas. A primeira verificação seria quanto à rigidez do fuso de esferas. Tem-se então, como dados de cálculo:

- diâmetro do fuso $d = 14 \text{ mm}$
- comprimento útil total do fuso $l = 470 \text{ mm}$
- peso do conjunto $M = 11 \text{ kgf}$
- passo do fuso $p = 4 \text{ mm}$
- módulo de elasticidade $E = 206.000 \text{ N/mm}^2$

$$R_{\text{eixox}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E \cdot d^2}{l} = 1,65 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{(14)^2}{0,47} = 6,88 \text{ N/}\mu\text{m} \quad (4.6)$$

$$R_{\text{eixoy}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E \cdot d^2}{l} = 1,65 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{(14)^2}{0,62} = 52,16 \text{ N/}\mu\text{m} \quad (4.7)$$

Pode-se verificar, também, qual será a força axial estática máxima teórica permitida a ser aplicada sobre o fuso. Desta forma tem-se:

$$F_{\text{am}} = 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot b_k \cdot \frac{(d)^4}{(l)^2}$$

sendo b_k o coeficiente de força segundo o tipo de montagem tem-se pela tabela 4.5 :

Tipo de Montagem	bk
suportada-suportada	1
fixa-fixa	4
fixa-suportada	2
fixa-livre	0,25

Tab 4.5- Tipo de montagem x bk

então:

$$F_{amx} = 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25 \cdot \frac{(14)^4}{(0,47)^2} = 1478 \text{ N}$$

$$F_{amy} = 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot \frac{(14)^4}{(0,62)^2} = 6795,75 \text{ N}$$

Estes valores de carga são bastante elevados para os dois casos. Já que não existe força de usinagem, neste caso, poderemos comprovar se as forças axiais máximas teóricas são maiores que a força necessária para acelerar a massa. Sendo a aceleração máxima impulsiva do motor de 4,50 [m/s/s], e a massa de aproximadamente 11 kg, tem-se:

$$F_{acel} = (M) a_{max} + \frac{2 \cdot \pi}{hsp} \cdot \text{torque}_{\text{fricção}} \quad (4.8)$$

$$F_{acel} = 11 \cdot 4,50 + \frac{2 \cdot \pi}{4,0 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 54,99 \text{ N}$$

O que vem a ser insignificante perante a capacidade de carga teórica dos fusos. O torque de fricção foi determinado através do cálculo dos diversos elementos envolvidos no sistema, e das forças necessárias à movimentação destes elementos. Este cálculo será melhor descrito quando do dimensionamento dos motores.

A velocidade máxima permitida para os fusos, por sua vez, será:

$$vel_{máx} = 0,8 \cdot (vel \text{ crít}) \cdot (b \text{ crít})$$

sendo a velocidade crítica para a mecânica Y de 10.000 rpm e para a mecânica X de 6.000 rpm. O valor do coeficiente para velocidade crítica, (b crít), segundo a tabela 4.6 será de:

montagem	coeficiente b crítico
suportada-suportada	0,65
fixa-fixa	1,44
fixa-suportada	1,00
fixa-livre	0,21

Tab 4.6- Montagem x coeficiente para velocidade crítica

então a velocidade será de:

$$V_{\text{máx mecânica X}} = 0,8 \times 10000 \times 0,21 = 1680 \text{ rpm}$$

e

$$V_{\text{máx mecânica Y}} = 0,8 \times 6000 \times 1,0 = 4800 \text{ rpm}$$

Estas duas velocidades máximas são maiores do que a velocidade máxima da furadeira, que será de aproximadamente 660 rpm.

Já a vida do fuso será determinada pela fórmula:

$$L_t = \left[\frac{Ca}{f_m \cdot f_w} \right]^3 \cdot \left[\frac{1}{60 \cdot N_m} \right] \cdot 10^6 \quad (4.9)$$

onde: L_t = vida em horas

F_m = força axial média aplicada

F_w = fator de operação normal (1,2 a 1,5)

Ca = carga dinâmica do fuso

N_m = velocidade de rotação média.

Esta vida deverá ser de pelo menos 20.000 horas, e como no caso os esforços não são elevados ela certamente será superior.

Apesar dos resultados terem demonstrado que os fusos estão superdimensionados, estes foram escolhidos por se tratarem de fusos padrão de catálogo, que só foram encontrados nos comprimentos desejados com o diâmetro de 14 mm. Os fusos padrão de catálogo, além de facilitarem a reposição de peças, diminuem em muito os custos de fabricação, principalmente na execução de protótipos. Quando da produção da furadeira em escala industrial, deverá ser reestudada a utilização dos fusos que poderão, dependendo do caso, ser confeccionados especialmente.

Para suportar os dois fusos de esferas, foram utilizados dois sistemas de montagem. Na mecânica X foram utilizados dois rolamentos de contacto angular, colocados no extremo que tem

acoplamento com o motor. Os rolamentos são colocados com os sentidos dos contactos alternados para que o fuso resista tanto à esforços axiais, nos dois sentidos quanto à esforços radiais. O outro extremo do fuso ficou livre, completando o sistema de fixação do tipo "fixo-livre", que já havia sido mencionado nos cálculos anteriores.

Este tipo de montagem possui a desvantagem da redução da rigidez do fuso e da velocidade crítica, possível de ser alcançada. Apesar disso, ela foi escolhida por permitir a compensação de desalinhamentos que por ventura existam no sistema de transmissão do posicionador. Já para a mecânica Y, foi utilizado um sistema de montagem diferente do anterior. O sistema é suportado do lado oposto ao acoplamento do motor, ou seja, o rolamento resiste preferencialmente aos esforços do tipo radiais (Fig 4.8).

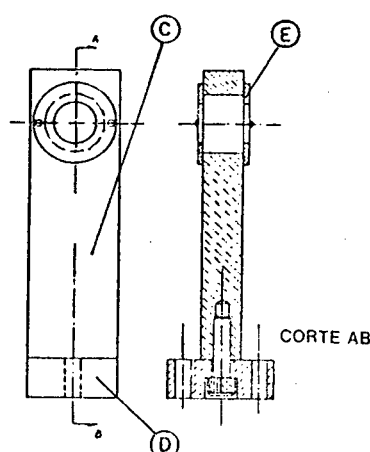


Fig. 4.8- Suporte do rolamento linear (mecânica Y).

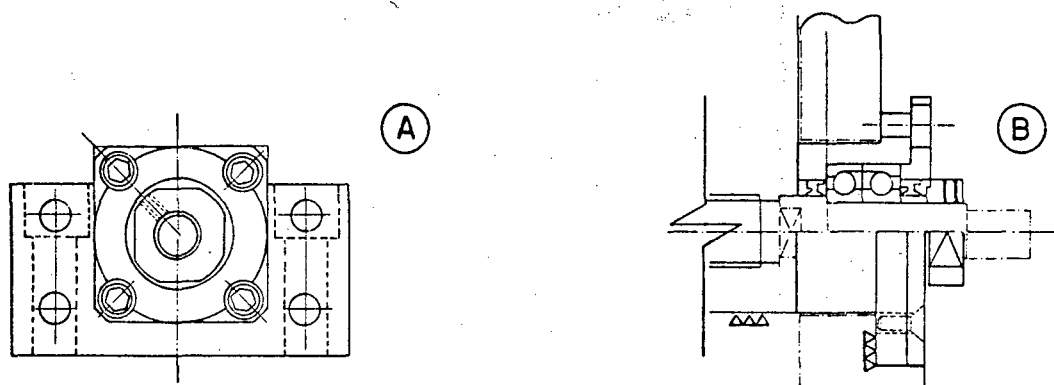
No extremo ao lado do sistema motor-acoplamento são utilizados dois rolamentos de contacto angular, como no caso anterior. Foi efetuado um rebaixo nos dois extremos do fuso para o acoplamento dos rolamentos. O extremo do fuso de esferas recirculantes, em que serão montados os rolamentos de contacto angular, terá um diâmetro de 12 mm. A montagem é do tipo fixo-suportado. Os rolamentos escolhidos foram os de contacto angular de esferas, com 30 graus de ângulo de contacto.

Para redução das folgas, que possivelmente seriam introduzidas no sistema, através dos rolamentos, foi utilizada uma pré-carga nos rolamentos pela própria fábrica dos fusos de esferas recirculantes. Para montagem dos rolamentos sobre o fuso, foi colocada uma porca apertada sobre uma rosca executada sobre o corpo do fuso, fixando os rolamentos rigidamente sobre um encosto de diâmetro 15mm, usinado no próprio fuso de esferas, e introduzindo aquela pré-carga recomendada.

O torque recomendado pela fábrica para o aperto desta porca é de 140 daN.cm. Esta e a pré-carga foi aplicada nos conjuntos das

mecânicas X e Y, já que os fusos de esferas recirculantes e os rolamentos de contacto angular serão iguais.

A mecânica Y ainda terá sobre a outra extremidade um rolamento radial de esferas, montado sobre um rebaixo de diâmetro 10 mm, usinado no fuso de esferas. Como este rolamento não sofrerá praticamente nenhum esforço axial, ele é fixado sobre o fuso através da utilização de um anel elástico, que manterá o rolamento apoiado contra um encosto de diâmetro 14 mm.



Figs.4.9- Caixas dos rolamentos para os fusos das mecânicas X e Y

Para fixação dos rolamentos dos fusos sobre a estrutura da mesa, foram usinadas dois tipos de caixas. Para a mecânica X foi confeccionada uma caixa tipo apoio, (Fig.4.9 A), e para a mecânica Y uma caixa tipo flange (Fig.4.9 B). As duas caixas utilizam como material o ferro fundido nodular, FE5007 (ferrítico-perlítico) e foram confeccionadas segundo o modelo caixa com tampa. Para as duas foi usado um vedador tipo labirinto, em forma de F, que trabalha em ranhuras da própria caixa.

A fundição e a usinagem foram executadas com precisão e foram feitas seguindo um modelo semelhante ao tipo BK, recomendado pelo próprio fabricante dos rolamentos, e aos tipos flangeado e de apoio de uma indústria nacional. As superfícies que possuem contacto dos rolamento com a caixa e da caixa com a estrutura da mesa, foram retificadas.

A caixa desenvolvida para a mecânica X foi fixada sobre o granito base. Já para a mecânica Y, a caixa flangeada foi fixada através de parafusos sobre a placa, que serve de suporte para as guias no ponto central a elas (Fig.4.4).

Para a fixação da caixa do fuso de esferas utilizou-se a mesma altura usada para a fixação das guias, tomando-se como base a parte inferior da placa. Esta placa é fixada em outras duas, pelos seus lados, e em uma outra que servirá de base. Outra placa será colocada paralela a esta, a uma distância pré-determinada e servirá de apoio ao motor de passo. Com isso, consegue-se uma rigidez bastante apreciável do conjunto, mesmo com a utilização de alumínio como material estrutural. Na mecânica Y, para a montagem do rolamento de

suporte, foi executada uma caixa de alumínio que mantém a mesma altura de centro da montagem, no outro extremo. Como no suporte das guias, este também possui regulagem no sentido transversal ao do fuso feito na fixação da base de alumínio da peça, com o granito através de furação alargada nesse sentido.

A caixa possui dois parafusos de aperto para fixação do rolamento, além de ser uma caixa executada segundo modelo de caixa sem tampa. Além disso, a união entre o sistema de transmissão e as bases (mesas), foi feito através de flanges parafusadas tanto na castanha do fuso de esferas quanto na mesa, através de parafusos Allen.

Para união do sistema de transmissão (fuso de esferas recirculantes) com o sistema motriz (motor de passo), foram utilizados acoplamentos de compensação.

4.5.4.- Acoplamentos Utilizados

Devido a problemas decorrentes da usinagem das peças, e dificuldades da centralização do sistema motriz em relação ao sistema de transmissão, deve-se utilizar acoplamentos de compensação. Estes, permitem alguma mudança de posição entre os eixos, sem comprometer a transmissão dos movimentos, nem sobrecarregar com esforços decorrentes de montagem incorreta, os rolamentos de sustentação do sistema de transmissão e do sistema motriz.

Quatro são os tipos de acoplamentos de compensação indicados para o nosso sistema de montagem:

- a junta Oldham;
- a junta Cardan dupla;
- o acoplamento de foles e
- o acoplamento helicoidal.

Devido à transmissão de calor do motor para o fuso, que se dá através do acoplamento, a utilização dos acoplamentos de peça única foram descartados. Já as juntas tipo Oldham, permitem a utilização de um elemento de conexão central confeccionado em material isolante térmico (diatérmico).

Existem juntas do tipo Oldham, que possuem o elemento de ligação central resistente a maiores esforços este com geometria diferenciada (Fig 4.10). Optou-se, então, pela utilização destas juntas nas duas mecânicas. O material utilizado para os elementos de ligação foi o Teflon, e o diâmetro do conjunto foi determinado pela tabela 4.7.

Diâmetro	Medidas		Torque
[mm]	H1	L	Transmitido [N.m]
15,8	7,9	16,6	0,14
15,8	7,9	17,4	0,14
15,8	7,9	18,2	0,14
15,8	9,5	18,2	0,56
15,8	9,5	19,0	0,56
15,8	12,7	19,8	1,41
34,9	19,0	39,6	3,53
38,0	25,4	20,63	5,29

Tab 4.7 - Medidas x Torque transmitido de acoplamentos tipo junta Oldham

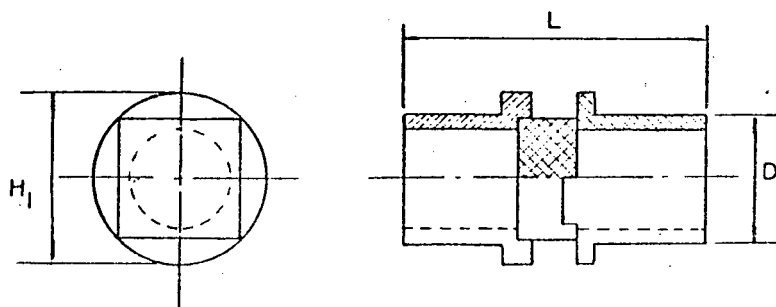


Fig. 4.10- Acoplamento do tipo Junta Oldham

O desalinhamento máximo entre eixos poderá ser de 01 grau e a folga máxima de 05 minutos/12//23/.

4.5.5.- Motores

Como já havia sido mencionado no início, os motores utilizados foram os motores de passo. Este tipo de motor produz uma simplificação no sistema eletrônico a ser desenvolvido, além de permitir o funcionamento da máquina operatriz, sem o sensoriamento e a realimentação de posição, ou seja, em malha aberta. Estes motores foram acoplados diretamente sobre o fuso de esferas, sem a necessidade de transmissões intermediárias, utilizados para aumentar a resolução do sistema ou reduzir os esforços produzidos pelas massas. Para fixação dos motores de passo sobre a base da máquina operatriz, foi utilizado um sistema de união flangeado para as duas mecânicas, (fig. 4.11), o que veio a facilitar a transferência de calor produzido no motor, além de facilitar a montagem e desmontagem dos mesmos.

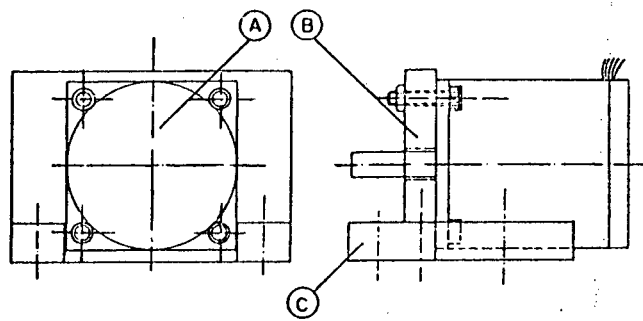


Fig. 4.11.- Sistema flangeado usado para fixação do motor do mecânica X.

A furação desses dois suportes flangeados, foi feita de maneira a permitir uma pequena regulagem na altura de fixação dos motores. Procurou-se com esse tipo de montagem, e com a utilização de material diatérmico entre os elementos do acoplamento, evitar a transmissão de calor, produzido no motor, para o fuso de esferas recirculantes, o que seria desastroso. A precisão do sistema seria bastante comprometida com a dilatação do elemento de transmissão. Já o dimensionamento dos motores dependerá de dois torques a serem encontrados. O primeiro é o torque total de fricção do sistema, ou seja, o torque necessário para suplantar todas as forças de fricção das diferentes partes do conjunto. O segundo é o torque de aceleração, necessário para acelerar o conjunto até uma determinada velocidade num tempo estimado. Supondo que cada uma das mecânicas tenha uma massa $M =$ (massa total de cada uma das mecânicas) = 11 kg, tem-se:

μFg = coeficiente de fricção das guias = 0,002

p = passo do fuso = $4 \cdot 10^{-3}$ m

g = aceleração da gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$

F_c = força de corte transversal = 0 N (não há força de corte no sentido transversal quando há movimento dos eixos x e y)

μFr = coeficiente de fricção do rolamento = 0,002

P_c = pré carga no rolamento = 65 N

d_r = diâmetro do rolamento = $26 \cdot 10^{-3}$ m

d_f = diâmetro do fuso de esferas = $14 \cdot 10^{-3}$ m

Tem-se, então, que o torque friccional das guias de rolamento é igual a:

$$T_{fg} = \mu Fg \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \left[(M) \cdot g + F_c \right] \quad (4.10)$$

$$T_{fg} = 0,002 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \left(11 \cdot 9,81 + 0 \right)$$

$$T_{fg} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

O torque friccional para cada um dos rolamentos do fuso de esferas é:

$$T_{fr} = \mu Fr \cdot \frac{1}{2} \cdot dr \cdot Pc \quad (4.11)$$

$$T_{fr} = 0,002 \cdot \frac{1}{2} \cdot 26 \cdot 10^{-3} \cdot 65$$

$$T_{fr} = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

como serão dois rolamentos, tem-se:

$$T_{fr \text{ total}} = 3,38 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

As perdas por fricção na castanha do fuso de esferas recirculantes são:

$$\eta_{fuso} \cong \frac{1}{1 + 0,02 \cdot \frac{df}{\rho}} \quad (4.12)$$

$$\eta_{fuso} \cong \frac{1}{1 + 0,02 \cdot \frac{14 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}}}$$

$$\eta_{fuso} \cong 0,934$$

O torque friccional, devido às peças, será então de:

$$T_{fp} = \frac{T_{fg}}{\eta_{fuso}} + T_{fr} / \eta_G \cdot i \quad (4.13)$$

sendo η_G = rendimento das engrenagens e
 i = relação de transmissão.

como a transmissão é feita de maneira direta, então η_G e i são iguais à 1, e tem-se:

$$T_{fp} = \frac{1,37 \cdot 10^{-4}}{0,934} + 3,38 \cdot 10^{-3} / 1$$

$$T_{fp} = 3,52 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

O torque de fricção total vem a ser a soma do torque de fricção das peças T_{fp} com o torque de fricção da força de corte T_{fc} .

O torque da força de corte é:

$$T_{Fc} = \frac{F_{cl} \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_G \cdot \eta_{sm}} \quad (4.14)$$

onde F_{cl} = força de corte longitudinal.

Como nesse caso não existe força de corte no sentido longitudinal, tem-se, então:

$$T_{Ft} = T_{Fp} + T_{Fc} = 3,52 \cdot 10^{-3} + 0 = 3,52 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \quad (4.15)$$

Já para o torque necessário à aceleração, tem-se que calcular os momentos de inércia das peças sujeitas à movimentação, além de estabelecer uma diferença de velocidade a ser alcançada em um determinado tempo.

Faz-se então primeiramente os cálculos relativos aos momentos de inércia.

Momento de inércia sobre o fuso de esferas:

$$J_{\text{fuso}} = \frac{\pi \cdot l \cdot \rho \cdot d^4}{32} \quad (4.16)$$

onde: L = comprimento útil do fuso

ρ = peso específico

d = diâmetro do fuso

$$J_{\text{fuso}} = 0,77 \times 10^{-12} \times 14^4 \times 470 = 13,90 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_{\text{carga}} = M \cdot \left[\frac{\rho}{2 \cdot \pi} \right]^2 \quad (4.17)$$

$$J_{\text{carga}} = 11 \cdot \left[\frac{4 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi} \right]^2$$

$$J_{\text{carga}} = 4,46 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

A inércia total das peças do sistema é igual a:

$$J_{\text{externo}} = \frac{J_{\text{eng}_1} + J_{\text{eng}_2} + J_{\text{carga}} + J_{\text{fuso}}}{i^2} \quad (4.18)$$

sendo:

J_{eng_1} = inércia da engrenagem 1

J_{eng_2} = inércia da engrenagem 2

i = relação de transmissão

Como, neste caso, a transmissão é direta, tem-se:

$$J_{\text{externo}} = \frac{0 + 0 + 4,46 + 14,46}{i^2} \cdot 10^{-6} = 18,92 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

A inércia total será a soma da inércia do conjunto com a inércia do motor. Tomando-se do catálogo a inércia de um motor de 2,0 Nm, tem-se:

$$J_{\text{motor}} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \quad (4.19)$$

$$J_{\text{total}} = J_{\text{externo}} + J_{\text{motor}}$$

$$J_{\text{total}} = (0,1892 + 1,1) \cdot 10^{-4} \text{ Kgm}^2$$

$$J_{\text{total}} = 1,2892 \cdot 10^{-4} \text{ Kgm}^2$$

O torque para aceleração será de:

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{J_{\text{total}} \cdot \text{Dif de velocidade}}{\text{tempo}} \quad (4.20)$$

A diferença de velocidade será conhecida como rampa, e neste caso, terá uma variação da imobilidade zero até a velocidade de 660 rpm ou seja: Dif. de velocidade = 660 rpm.

Já o tempo para atingir esta velocidade será estimado em 100 ms, já que o tempo ótimo para posicionamento de um eixo de máquina operatriz será de 400 ms /35/. Tem-se então:

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{1,2892 \cdot 10^{-4} \cdot 660}{0,1}$$

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = 0,0891 \text{ Nm}$$

O torque total do motor será a soma do torque de fricção e do torque de aceleração. Sendo assim, tem-se:

$$\text{Torque}_{\text{total}} = \text{Torque}_{\text{fricção}} + \text{Torque}_{\text{aceleração}}$$

$$\text{Torque}_{\text{total}} = 0,00352 + 0,0891$$

$$\text{Torque}_{\text{total}} = 0,0926 \text{ Nm}$$

Os motores de passo utilizados para as duas mecânicas foram os de 2,2 Nm pois já haviam sido adquiridos através de um projeto de pesquisa. Pode-se observar pelos cálculos efetuados que a inércia do motor é de valor mais elevado do que a inércia total das peças do sistema comprovando estar o motor superdimensionado. Além disso sabe-se que quanto maior o torque pior a dinâmica do motor. Apesar disto pelas curvas apresentadas por estes motores verifica-se que na velocidade indicada para o posicionamento da mesa os mesmos apresentam

torque compatível com aquele necessário, e este torque deverá ser aumentado com o desenvolvimento do sistema de potência permitindo a utilização das Mecânicas X e Y em velocidades de posicionamento acima das definidas teoricamente.

4.6.- Desenvolvimento da mecânica Z

A mecânica Z da furadeira é a responsável pelos movimentos de corte e avanço, que efetivamente farão a furação na placa de circuito impresso.

As mecânicas X e Y somente posicionarão a linha de centro da broca sobre o ponto desejado a ser furado. O elemento que fará o movimento de corte será chamado cabeçote, que alcança altas velocidades, possui baixo peso, e poderá ser acionado de duas formas distintas como visto no item 3.5 do capítulo 3.

Apesar das vantagens apresentadas pelo sistema pneumático, optou-se pelos motores de corrente alternada de alta frequência para o cabeçote, e um sistema de avanço acionado por um motor de passo, devido fundamentalmente à problemas construtivos.

As turbinas encontradas no mercado, são partes integrantes das furadeiras manuais para PCIs, formadas de peças nacionais e importadas e que não foram fornecidas para teste por duas indústrias por nós contactadas. Além disso, essas turbinas foram fabricadas para serem fixadas na estrutura da mesa, não tendo os fabricantes tido a preocupação da redução de peso e volume, que são bastante elevados nas turbinas analisadas. Já a construção de um sistema pneumático especial, só será possível quando o volume de peças compensar a fabricação. Outra alternativa analisada foi a da aplicação de turbinas de material odontológico, para a furação das placas. Isto acabou se revelando inviável devido ao baixo torque encontrado nestas turbinas. A construção de uma nova turbina com maior torque, levaria ao problema de produção de um lote mínimo de peças, algo inviável, visto que a furadeira ainda está em fase de protótipo.

Outro motivo que levou à utilização de um cabeçote acionado por um motor de corrente alternada de alta frequência, foi o desenvolvimento de um sistema alternativo às turbinas pneumáticas. Este existe nas furadeiras importadas, mas não é encontrado nas máquinas no mercado, nem mesmo naquelas onde a quase totalidade de suas peças não é de fabricação nacional.

Existem motores de corrente alternada de alta frequência no mercado, comercializado por indústria local, que possuem um peso bastante baixo (cerca de 450 gramas), e atingem velocidades elevadas de até 100.000 rpm, com um torque necessário para fresagens e furações de uma série de placas ao mesmo tempo.

Já para o movimento de avanço, foi desenvolvido um sistema semelhante ao utilizado para as mecânicas X e Y, ou seja, um motor de

passo, acionando através de 01 fuso de esferas recirculantes uma mesa apoiada sobre um sistema de guias deslizantes. A escolha desse sistema resultou, basicamente, da rigidez estrutural e precisão de movimento, necessários quando se executam furos de pequeno diâmetro.

Outros sistemas de avanço, que possuem transmissão através de correntes sincronizadoras, não se mostraram tão eficientes quanto à estas características, apesar de apresentarem uma velocidade de movimento mais elevada quando comparadas com o fuso utilizado.

A motorização do posicionador através de um motor de passo como sistema motriz, possibilitou a obtenção de uma boa qualidade de superfície interna ao furo, além de ter facilitado o desenvolvimento do controle eletrônico, semelhante ao utilizado para as mecânicas X e Y.

Todo o sistema foi construído de maneira a ser o mais leve possível, para que não ultrapassasse os 11 kg de carga sobre a mecânica Y que foram inicialmente previstos. Ao mesmo tempo, a rigidez estrutural precisou ser mantida. Deste modo, escolhemos o alumínio, como material estrutural a ser utilizado na maioria das peças da mecânica Z da furadeira.

Sobre a mecânica Y foi construído um suporte perpendicular à mesa (Fig. 4.12 L), de forma a produzir uma base, onde se pôde montar a mecânica Z. Sobre esta base, e paralelamente à mecânica Y foi construída outra placa (Fig. 4.12 I) que serviu de apoio ao motor e ao fuso de esferas recirculantes da mecânica Z.

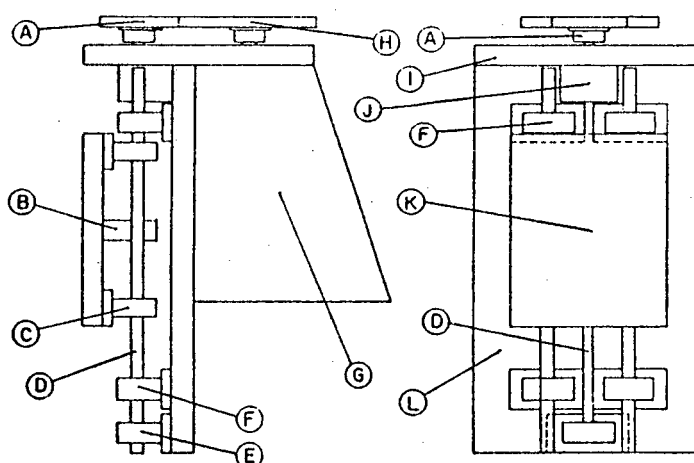


Fig. 4.12.- Sistema de avanço da mecânica Z.

Perpendicularmente, à base da mecânica Z e à placa de apoio do motor, foram colocadas duas placas de alumínio que, parafusadas às estruturas das mecânicas Y e Z, formam um conjunto em forma de caixa bastante rígido.

Para o dimensionamento do fuso de esferas recirculantes, do motor e das peças móveis, o primeiro cálculo a ser analisado, foi a

potência de corte necessária para a furação das PCIs, utilizando o diâmetro de broca mais comum, igual a 1 mm e avanço médio de 2.200 mm/min ou 0,0366 mm/rot. No cálculo, determina-se a força axial na furação, que será bastante importante no dimensionamento do motor de passo, que será utilizado.

Tem-se que a secção do cavaco, nas duas arestas de corte, será dada por:

S = secção do cavaco em mm

a = avanço em mm

d = diâmetro da broca em mm.

$$S = \frac{a \cdot d}{2 \times 2} \quad (4.21)$$

$$S = \frac{0,0366 \times 1}{2}$$

$$S = 0,0091 \text{ mm}^2$$

A reação do corte (R), será:

$$R = S \cdot R_e$$

onde: R_e = resistência específica do material

$$R_e = 1,22 \text{ kg}$$

Então a força axial de corte é:

$$\frac{F}{2} = R \cdot \sin \frac{\epsilon}{2} \text{ sendo } \epsilon = \text{ângulo de ponta da broca igual a } 120^\circ \quad (4.22)$$

em média

$$F = 2,11 \text{ kg}$$

Já o momento de rotação de furar, será:

$$M_r = 2 \cdot K \cdot \frac{d}{4} \quad \text{onde } K = \text{força para o corte}$$

$$K = \frac{a \cdot d}{2 \cdot 2} \cdot r_e \quad \text{então:}$$

$$M_r = \frac{2 \cdot a \cdot d \cdot r_e \cdot d}{2 \cdot 2 \cdot 4} = \frac{d^2}{8} \cdot a \cdot r_e = \frac{1^2}{8} \cdot 0,0366 \cdot 133,58 \quad (4.23)$$

$$M_r = 0,061 \text{ kg mm}$$

Para uma rotação máxima de 60.000 rpm, a potência de corte será:

(4.24)

$$P_c = P_g + P_a$$

onde: P_g = potência de giro

P_a = potência de avanço.

$$P_a = \frac{F \cdot v}{60 \cdot 75} = \frac{4,2 \cdot 188,49}{4500} = 0,17 \text{ Cv} \quad \text{onde } v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

$$P_g = \frac{M_r \cdot n}{71620} = 0,511 \text{ Cv}$$

$$v = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 80000}{1000}$$

$$P_c = 0,14 \text{ Cv}$$

$$v = 188,49 \text{ m/min}$$

A partir desta força, determina-se que o motor de corrente alternada de alta frequência utilizado, é adequado à potência necessária ao corte. A massa total do motor é de 0,45 kg e a base sobre a qual este motor ficará fixado, terá dimensões de 100 x 80 mm, e será construída de alumínio, o que diminuirá o peso do conjunto (Fig. 4.12K).

Esta base será apoiada em quatro buchas lineares (Fig. 4.12C) que deslizarão em guias cilíndricas de aço especial. Como o motor e a base serão fixadas a uma determinada distância das buchas, e o peso do conjunto será aplicado no sentido longitudinal à guia, teremos um momento aplicado sobre o conjunto, que promoverá o aparecimento de reações de apoio sobre os 4 rolamentos. Estas reações de apoio, em cada um dos rolamentos será de aproximadamente 0,14 kg, sendo que a reação nos dois rolamentos, lineares inferiores, terá sentido inverso ao dos dois rolamentos lineares superiores.

Estes esforços, aplicados a uma distância de 80 mm para cada um dos eixos, leva à escolha de uma guia com diâmetro de 1/4" ou 6,35 mm, já que os rolamentos lineares são importados com valores em polegadas. A capacidade de carga de cada um dos rolamentos lineares fechados, é de 265 N, e estes ainda tem a capacidade de serem ajustados, quanto aos seus diâmetros internos, através do aperto dos mancais. Os mancais possuem projeto semelhante aos utilizados na mecânica Y, e são parafusados na base da mecânica Z. Para permitir alguma regulagem, os mesmos possuem furação alargada no sentido transversal ao das guias. As guias, tal como as utilizadas nas mecânicas X e Y, foram confeccionadas de aço, segundo a norma ABNT, da vilares VC-52 temperadas e retificadas, e possuem uma dureza de 60 HRC. Cada uma das guias foi fixada em dois pontos, através de suportes perimetrais fabricados em duralumínio, que são parafusados sobre a base fixa da mecânica Z, no sentido transversal à guia. Além disto, um parafuso colocado num rasgo aberto junto à furação principal de apoio ao eixo, fará a fixação da guia ao suporte tal como nos suportes da mecânica Y.

Para transmissão dos movimentos do motor à base móvel da mecânica Z, foi utilizado um fuso de esferas recirculantes (Fig. 4.12D). Como o motor utilizado será do tipo passo a passo, a velocidade de rotação do motor atingida será de cerca de 700 rotações por minuto,

para um motor de 200 passo por volta. Sendo assim, como os avanços requeridos são elevados, necessita-se de um fuso com passo grande e pequeno diâmetro, já que a carga do conjunto sobre a mecânica Z não pode ser muito elevada. Um fuso de esferas recirculantes com estas características não foi encontrado no mercado.

Sabendo-se que:

- Força axial de corte (F) = 4,22 kg
- Peso do conjunto = 1 kg.
- Comprimento útil máximo = 15 mm
- Vida útil = 20.000 horas

pode-se efetuar um cálculo prévio do fuso a ser utilizado semelhante àquele para as mecânicas X e Y. O primeiro passo será a seleção do passo do fuso:

$$P \geq \frac{V_{\max}}{N_{\max}} = \frac{2 \cdot 200 \text{ mm/min}}{700 \text{ rot/min}} = 3,14 \text{ mm}$$

Para selecionar o diâmetro, tem-se que:

$$dr \geq \left[\frac{F \cdot (L)^2}{m} \cdot 10^{-3} \right]^{1/4} = \left[\frac{53,62 \cdot (150)^2}{m} \cdot 10^{-3} \right]^{1/4} \quad (4.25)$$

Sendo $m = 10,2$, coeficiente segundo o tipo de montagem (fixo-suportado)

Já a força axial máxima será:

$$F = W + \frac{W}{g} \cdot \alpha$$

Onde: W = peso aplicado no eixo Z = 51,69 N.
 g = aceleração da gravidade = 9800.

$$\alpha = \frac{V}{60 \cdot t_1}$$

para: V = velocidade = 2.200 mm/min.

t_1 = tempo para rampa de aceleração = 0,1 seg., assim:

$$F = W + \frac{W}{g} \cdot \frac{V}{60 \cdot t} \quad (4.26)$$

$$F = 51,69 + \frac{51,69}{9800} \cdot \frac{2200}{60 \cdot 0,1} = 53,62 \text{ N}$$

$$dr \geq 3,29 \text{ mm}$$

$$dm \leq \frac{70000 - 70000}{d} = 100 \text{ mm}$$

Selecionou-se previamente então um fuso de esferas recirculantes em miniatura, retificado, da marca Thompson, com medidas em polegadas de :

Diâmetro principal = 3,556 mm
 passo = 1,5875 mm ou 1/16"
 massa = 150 g
 carga máxima permitida = 890 N

Supondo um tempo de posicionamento de 0,4s dividido em 0,1s para aceleração, 0,1 s para desaceleração e 0,2 s para deslocamento em velocidade máxima, nós poderemos encontrar a velocidade e a força médias iguais a:

$$Nm = \left(\frac{Na \cdot ta + Nb \cdot tb + Nd \cdot td}{ta + tb + td} \right) \quad (4.27)$$

$$Fm = \left(\frac{Fa^3 \cdot Na \cdot ta + Fb^3 \cdot Nb \cdot td + Fd^3 \cdot Nd \cdot td}{Na \cdot ta + Nb \cdot td + Nd \cdot td} \right)^{1/3} \quad (4.28)$$

onde: Na = velocidade de rotação no trecho de aceleração = 350 rpm
 ta = tempo no trecho de aceleração = 0,1 seg.
 Fa = força no trecho de aceleração = 49,75 N
 Nb = velocidade de rotação no trecho de vel. máx. = 700 rpm
 tb = tempo de trecho de velocidade máx. = 0,2 seg.
 Fb = força no trecho de velocidade máx. = 51,69 N.
 Nd = vel. de rotação no trecho de desaceleração = 350 rpm.
 td = tempo do trecho de desaceleração = 0,1 seg.
 Fd = força no trecho de desaceleração = 53,62 N.

Tem-se, então:

$$Nm = \frac{350 \cdot 0,1 + 700 \cdot 0,2 + 350 \cdot 0,1}{0,4} = 525 \text{ rpm}$$

$$Fm = \left(\frac{(49,75)^3 \cdot 350 \cdot 0,1 + (51,69)^3 \cdot 700 \cdot 0,2 + (53,62)^3 \cdot 350 \cdot 0,1}{350 \cdot 0,1 + 700 \cdot 0,2 + 350 \cdot 0,1} \right)^{1/3}$$

$$Fm = \left(\frac{4309702 + 19335153 + 5395708}{35 + 140 + 35} \right)^{1/3}$$

$$Fm = 51,71 \text{ N}$$

A carga aplicada ao fuso para uma vida de $L_t = 20.000$ horas e para um fator de carga de $f_w = 1,2$, será:

$$Ca \geq (60 \cdot Nm \cdot Lt)^{1/3} \cdot Fm \cdot Fw \cdot 10^{-2} \quad (4.29)$$

$$Ca \geq (60 \cdot 525 \cdot 20000)^{1/3} \cdot 51,71 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}$$

$C_a \geq 532 \text{ N}$

Como este fuso de esferas pode suportar cargas dinâmicas de até 890N, não existe problema de ocorrer um desgaste prematuro do fuso, por excesso de carga. Além disto, é preciso se verificar que as condições para as quais o cálculo foi feito são as mais desfavoráveis possíveis, e só ocorrerão no caso de um travamento da broca na saída do furo, o que faria a somatória da força de corte axial em relação ao material junto ao peso do conjunto sustentado pelo fuso, o que só ocorrerá em caso de acidente. Mesmo neste caso, pelo critério de rigidez do fuso de esferas, ele suportará com folga aos esforços a que está submetido. O fuso escolhido não possui o passo desejado. Para que o mesmo seja alcançado, necessitamos de um sistema de transmissão, colocado entre o motor e o fuso de esferas recirculantes, que duplique o passo do fuso de esferas. Foram utilizadas então duas engrenagens (Fig. 4.12 A e H) de dentes retos, com relação de transmissão:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{vel. motor}}{\text{vel. eixo}} = \frac{1}{2} \quad (4.30)$$

Fundamentalmente esta escolha deveu-se à distância entre centros do motor e do fuso pouco elevada, que inviabilizou a utilização de correias dentadas. As engrenagens foram feitas de Celeron, com módulo de 1,0 e possuem 72 dentes na engrenagem motora, e 36 dentes na engrenagem movida (ligada ao fuso de esferas recirculantes), necessários para que se mantivesse a distância entre os centros do fuso e motor, dentro da necessidade exigida pela montagem do conjunto. A engrenagem movida é fabricada em duas seções, ligadas por molas que minimizam as folgas entre as duas engrenagens, depois de montadas.

Para o fuso foi utilizado o sistema de fixação do tipo fixo-suportado, com dois rolamentos de contacto angular na extremidade próxima à engrenagem. Os rolamentos possuem um ângulo de contato de 30 graus, e foram montados em uma caixa de ferro fundido com tampa. Esta foi parafusada sobre a base fixa da mecânica Z, e possui abertura das furações no sentido transversal ao fuso de esferas recirculantes.

Para o outro extremo, foi utilizado um rolamento radial de esferas apoiado em um suporte de alumínio parafusado sobre a base fixa da mecânica Z, que mantém uma altura da base até o centro do fuso de esferas recirculantes, igual ao do outro suporte.

Já o motor foi fixado sobre a placa de apoio paralela à base da mecânica Y através de 4 parafusos. Esta montagem foi feita de maneira que o motor ficou em uma posição inferior desta placa, o que permitiu, além da colocação da transmissão por engrenagens entre o fuso de esferas e motor, baixar o centro de gravidade do conjunto da mecânica Z, balanceando melhor as cargas aplicadas sobre os quatro

rolamentos lineares da mecânica Y. As furações de montagem do motor, foram também alargadas com o sentido de permitir a regulagem do engrenamento entre o fuso de esferas recirculantes, e o motor de passo. A massa de todo conjunto da mecânica Z, apoiada sobre a mecânica Y, após a montagem é de 9,89kg, estando abaixo da massa prevista que era de 11kg. Já para a mecânica X, alcançou-se uma massa de 10,12 kg, quase igual à da mecânica Y, o que comprovou a idéia inicial de utilização de motores iguais para os dois eixos.

Pelos critérios dos momentos e das forças aplicados sobre as guias da mecânica Y, tem-se que a reação de apoio a cada um dos rolamentos lineares da guia mais carregada, será de $R_a = 3,78\text{kg}$, menor do que a massa prevista. Já para a guia menos carregada, atingiu-se para cada rolamento uma reação de apoio $R_b = 1,165\text{kg}$.

Apesar dos esforços, não se conseguiu melhorar a distribuição deste peso sobre as guias, sem que isto causasse problemas para a rigidez do conjunto.

Para o dimensionamento do motor de passo que aciona a mecânica Z é necessário considerar além dos esforços exercidos sobre os rolamentos lineares provocados pelo peso aplicado ao conjunto, a força axial necessária para furação das placas de circuito impresso, o peso do conjunto que é aplicado no mesmo sentido do deslocamento da mesa e a transmissão por engrenagens. Existem dois casos a serem analisados. Um no qual os cálculos são efetuados com base nos esforços verificados para um movimento ascendente da mecânica Z, e outro para os esforços verificados para um movimento descendente. Sabendo-se que não há esforço de corte para o movimento ascendente (somente o peso próprio), e que o valor do esforço de corte verificado no movimento descendente é maior que o esforço contrário provocado pelo peso próprio conclui-se que o caso mais desfavorável será o verificado no movimento descendente e portanto o cálculo será efetuado para este. Com a relação de transmissão $i=0,5$, presente entre o fuso e o motor e para o qual o torque necessário deve ser maior que para um acoplamento direto entre o motor e o fuso. Sendo, para este caso:

$$\mu_{fg} = \text{coeficiente de fricção das guias} = 0,002$$

$$p = \text{passo do fuso de esferas} = 1,5875 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$R_{ap} = \text{reações de apoio} = 0,562 \text{ kg}$$

$$P_c = 9,81 \text{ N} = \text{peso do conjunto}$$

$$\mu_{F_r} = \text{coeficiente de fricção dos rolamentos de apoio do fuso} = 0,002$$

$$d_r = \text{diâmetro do rolamento} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d_f = \text{diâmetro do fuso de esferas} = 3,556 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_{cl} = 4,22 \text{ kg} = 41,3 \text{ N}$$

t = tempo de aceleração = 0,15 s

Dif.vel = diferença de velocidade para o motor = 700 m . in

i = relação de transmissão = 1/2

I_1 = inércia da engrenagem movida = $1,62 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$

I_2 = inércia da engrenagem no motor = $1,29 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$

Tem-se que:

Torque total = Torque friccional + Torque aceleração

O torque friccional, devido às peças, é igual à soma de alguns torques, que são:

Torque friccional nas guias de rolamento linear:

$$T_{fg} = \mu F_g \cdot \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \left[R_{ap} \cdot g + F_c \right]$$

$$T_{fg} = 0,002 \cdot \frac{1,5875 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \left[0,562 \cdot 9,81 + 0 \right]$$

$$T_{fg} = 2,78 \cdot 10^{-6} \text{ N.m}$$

Torque friccional nos rolamentos do fuso de esferas:

$$T_{fr} = \mu F_r \cdot \frac{1}{2} \cdot d_r \cdot P_c$$

$$T_{fr} = 0,002 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81$$

$$T_{fr} = 9,81 \cdot 10^{-5} \text{ N.m} \quad \text{para 2 rolamentos} = 19,62 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$$

Perdas por fricção na castanha do fuso de esferas recirculantes:

$$N_{\text{fuso}} \cong \frac{1}{1 + 0,02 \cdot \frac{df}{P}}$$

$$N_{\text{fuso}} \cong \frac{1}{1 + 0,02 \cdot \frac{3,556 \cdot 10^{-3}}{1,5875 \cdot 10^{-3}}}$$

$$N_{\text{fuso}} \cong 0,957$$

Perdas por engrenamento de peças:

$$T_{fp} = \frac{\frac{F_{fg}}{N_{fuso}} + T_{fr}}{N_g \cdot i}$$

$$T_{fp} = \frac{\frac{2,78 \cdot 10^{-6}}{0,957} + 19,62 \cdot 10^{-5}}{0,9 \cdot \frac{1}{2}}$$

$$T_{fp} = 0,442 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$$

Torque de fricção devido à força de corte:

$$T_{Fc} = \frac{F_{cl} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot N_g \cdot N_{sm}}$$

$$T_{Fc} = \frac{41,3 \cdot 1,5875 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,9 \cdot 0,957}$$

$$T_{Fc} = 0,0242 \text{ N.m}$$

O torque de fricção total é a soma dos torque de fricção devido às peças e do torque de fricção devido à força de corte:

$$T_{Fl} = T_{fp} + T_{Fc}$$

$$T_{Fl} = (0,44 + 24,2) \cdot 10^{-3}$$

$$T_{Fl} = 24,9 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$$

Torque para acelerar a mecânica:

O momento de inércia refletida sobre o fuso de esferas é:

$$J_{carga} = 1 \cdot \left[\frac{1,5875 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right]^2 \quad P_c = \left(\frac{p}{2 \cdot \pi} \right)$$

$$J_{carga} = 6,38 \cdot 10^{-8} \text{ kgm}^2$$

O momento de inércia sobre o fuso de esferas é:

$$J_{fuso} = \frac{\pi \cdot L \cdot p \cdot d^4}{32}$$

$$J_{fuso} = 0,77 \cdot 10^{-12} \cdot (3,556)^4 \cdot 20$$

$$J_{fuso} = 2,46 \cdot 10^{-8} \text{ kgm}^2$$

A inércia total do sistema:

$$J_{\text{externo}} = J_{\text{eng1}} + \frac{J_{\text{eng2}} + J_{\text{carga}} + J_{\text{fuso}}}{i^2}$$

$$J_{\text{externo}} = 1,62 \cdot 10^{-6} + \frac{1,29 \cdot 10^{-5} + 6,38 \cdot 10^{-8} + 2,46 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{1}{2}\right)^2}$$

$$J_{\text{externo}} = 53,6 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_{\text{total}} = J_{\text{externo}} + J_{\text{motor}} \quad \text{sendo:}$$

$$J_{\text{total}} = (53,6 + 11,6) \cdot 10^{-6} \quad J_{\text{motor}} = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_{\text{total}} = 65,2 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

O torque necessário para a aceleração no sentido descendente será:

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{J_{\text{total}} \cdot \text{Dif de velocidade}}{\text{tempo}}$$

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{6,52 \cdot 10^{-5} \cdot 700}{0,1}$$

$$\text{Torque}_{\text{aceleração}} = 0,047 \text{ N.m}$$

O torque total necessário, será, então:

$$\text{Torque}_{\text{total}} = 0,047 + 0,0249$$

$$\text{Torque}_{\text{total}} = 0,0719 \text{ N.m}$$

Apesar da inércia externa ser maior do que a inércia do motor optou-se pelo motor de 0,48 N m que possui um torque compatível ao torque calculado para velocidade de 700 rpm. Seu baixo peso que reduz a carga aplicada sobre as guias da mecânica Y, e o número reduzido de opções de torque dos motores de passo dos fabricantes nacionais foram outros motivos da escolha do motor de 0,48 N m para esta aplicação.

4.7.- Desenvolvimento do Conjunto Eletro-eletrônico

Para que um motor de passo gire, as suas bobinas devem ser energizadas, o que fará com que o motor mude de uma posição para a outra.

É necessário então que uma unidade central, (microcomputador) envie sinais (pulsos) em uma quantidade requerida

para uma lógica de passo (circuito lógico), que fará o seqüenciamento correto dos pulsos.

Antes que a seqüência de pulsos seja passada ao motor, é necessário que ela seja amplificada, através da eletrônica de potência, ao circuito de acionamento do motor. Isto permite que o motor seja energizado com a tensão e corrente indicados.

Para alimentação deste amplificador de potência é utilizada uma fonte de potência, com tensão determinada para cada motor.

4.7.1.- Microcomputador

Foi utilizado como unidade central de comando um microcomputador da linha IBM-XT.

Isto foi decidido devido ao fato de que a grande maioria das empresas, mesmo as pequenas, possuem um microcomputador, que pode ser ligado a uma furadeira de pequeno porte para furação de placas de circuito impresso.

Além disto, o custo do projeto seria mais elevado se fosse desenvolvido um microcomputador dedicado à furadeira.

A grande desvantagem da utilização desse tipo de computador é a de que enquanto, as furações estão sendo efetuadas pela máquina, não há possibilidade de execução de outras tarefas, tornando o computador, em alguns casos, ocioso. Este computador possui como unidade central de processamento um microprocessador 8088 de 16 bits.

Deste microprocessador foi empregada a Porta Centronics, que é no computador utilizada como conexão de impressora do tipo paralelo.

Conectando-se diretamente à esta porta, é dispensada a utilização de qualquer placa interna de interface entre o microprocessador e a lógica de passo, além do que o sistema é independente do hardware do micro-computador.

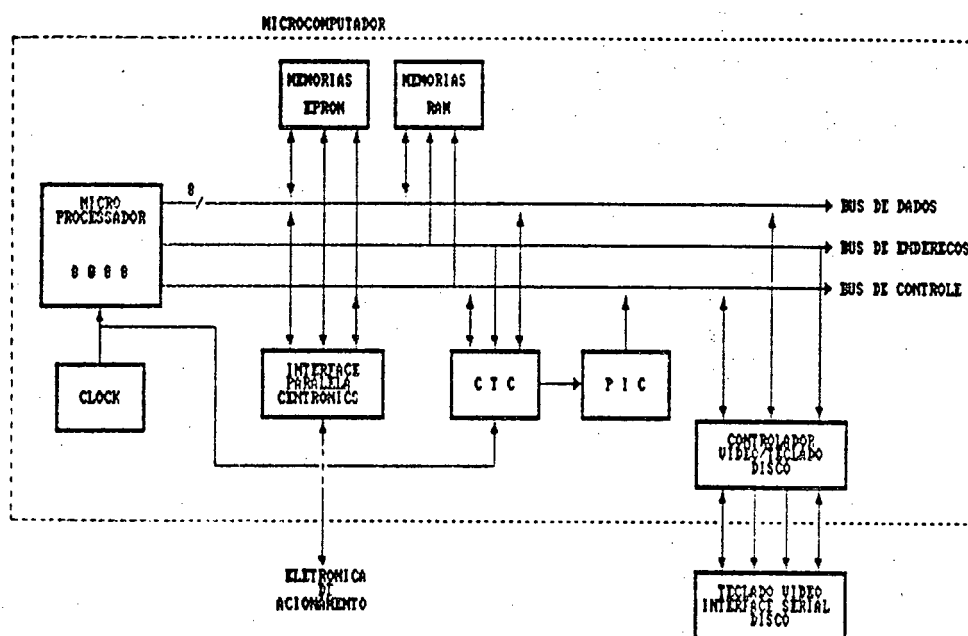
A Centronics é empregada como uma porta do tipo envia-recebe ou seja, envia sinais à lógica de passos, e recebe sinais dos sensores ópticos.

Os sinais recebidos e enviados são os seguintes: Sinais bits D0, D1 e D2; tipo de passo = passo completo e meio passo; mecânica X, sentido horário e antihorário; pulso para o passo.

Bits D3, D4 e D5, com tipo de passo: passo completo e meio passo; mecânica Y, sentido horário e anti-horário; pulso para o passo.

Bits D7 e D6, sentido anti-horário e horário; mecânica Z: pulso para o passo. Três bits para os sensores ópticos de posicionamento no zero e dois bits para os sensores ópticos de proteção extra.

Pelo diagrama em blocos do microcomputador PC-XT, (Fig. 4.13), podemos ter uma idéia do funcionamento do mesmo e de seus componentes principais.



CTC - CONTADOR / TEMPORIZADOR (8253)

PIC - CONTROLADOR DE INTERRUPÇÃO (8259)

Fig. 4.13.- Diagrama do microcomputador PC-XT.

Sendo o controlador de interrupção programável e, ainda, as duas memórias do computador que são EPROM (Eraseble Programable Read Only Memory), ou Memória programável, que possui os programas fixos, tais como:

- Teste de memória;
- Carga de sistema operacional;
- Rotinas internas;

A RAM (Randon Access Memory) arquiva os programas do usuário do computador e os dados gerais. Além disto, o computador possui um relógio interno (Clock) de 4,77 MHz.

O contador/temporizador CTC possui três canais, sendo que o canal 0 vem a ser o relógio do sistema.

Para operação normal o microcomputador deve ser interrompido na frequência de 18,2 Hz, para que o relógio interno seja atualizado.

Carrega-se o contador 0 com o valor que vai determinar a frequência de passos (Fig. 4.14).

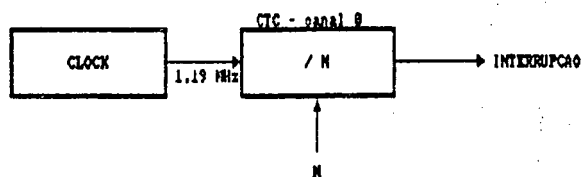


Fig. 4.14.- Carregamento do contador que determina a frequência de passos.

Sendo n , o número de passos, por segundo, do motor. A cada interrupção, um passo é gerado.

Ex.-

$$1000 \text{ pps} \rightarrow n = \frac{1,19 \text{ MHz}}{1000} \rightarrow n = 1,19 \times 10^3$$

Estas interrupções do motor servirão não só para movimentar o motor a uma determinada velocidade, como também levá-lo a atingir esta velocidade através da geração de rampas de aceleração e desaceleração, que permitirão com que o motor atinja a velocidade desejada, sem perda de passo. A partir da compreensão do microcomputador internamente, pode-se então analisar os componentes desenvolvidos.

Sabe-se que as eletro-eletrônicas desenvolvidas para as mecânicas X e Y são iguais, já que os motores e as cargas movimentadas são semelhantes, diferentemente da mecânica Z. Por isto, analisa-se primeiramente as mecânicas X e Y, e posteriormente, a mecânica Z.

4.7.2.- Eletro-eletrônica das mecânicas X e Y

O diagrama em blocos do sistema eletrônico de cada uma das mecânicas X e Y está representado na Fig 4.15.

O microcomputador, através dos bits D0, D1, D2, D3, D4 e D5 da porta Centronics, envia os sinais do tipo de passo-sentido, e o do pulso para troca de passos.

A lógica de passo fornecerá a sequência correta para a comutação das fases do motor. Esta sequência lógica será passada diretamente ao amplificador de potência.

Este amplificador é alimentado por uma fonte de corrente contínua.

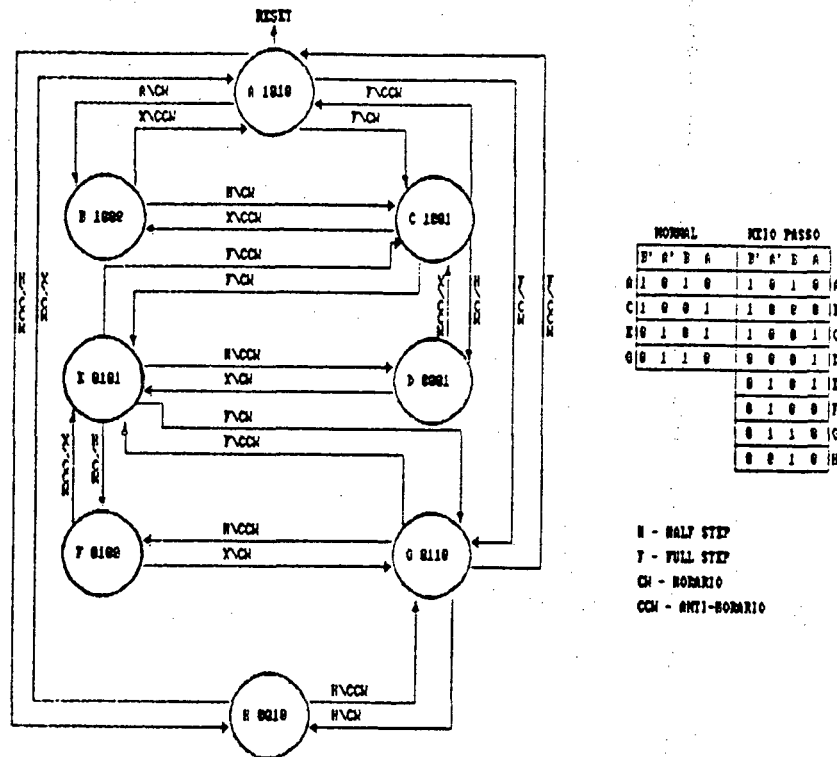


Fig. 4.16.-Máquina de Mealy da lógica de passo/mecânicas X e Y.

As informações são passadas para um registro que envia sinais à EPROM 2732, que passa 8 bits de dados para os amplificadores das mecânicas X e Y.

O circuito (fig. 4.17) implementa a máquina de estados definida pelo diagrama e pelas tabelas (fig. 4.16). Este circuito e o diagrama constituem a lógica de passo para as duas mecânicas.

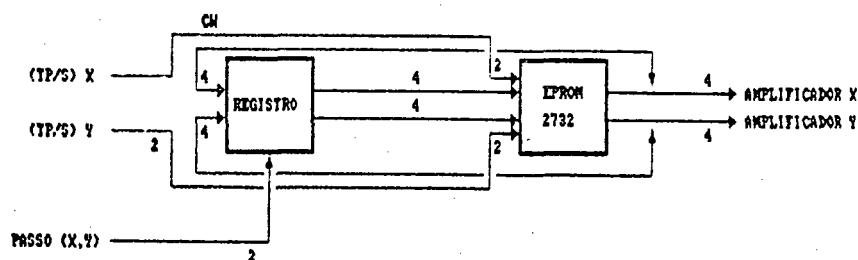


Fig. 4.17.- Circuito da lógica de passo, mecânicas X e Y.

4.7.2.2- Circuito de acionamento para os motores, mecânicas X e Y.

Os circuitos de acionamento dos motores de passo, como foi dito anteriormente, podem ter dois tipos de alimentação. A alimentação unipolar, onde a corrente circulará em um só sentido nas bobinas do motor, e a alimentação bipolar, onde a corrente poderá circular nos dois sentidos da bobina. Quanto às formas de alimentação, os amplificadores de potência podem ser de resistência-série, onde é colocada uma resistência em série com o enrolamento do motor, de dupla tensão e Chopper, ambas descritas no capítulo 3. O amplificador de potência, utilizado para acionamento dos motores das mecânicas X e Y é

do tipo Chopper e bipolar. O esquema de ligação das bobinas do motor está representado na fig.4.18, permitindo um aumento entre 25 à 35% no torque do motor por Watt, comparado à alimentação de fases não duplicadas.

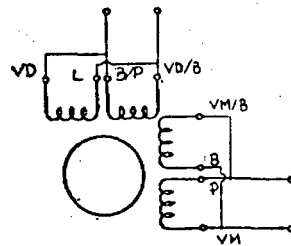


Fig. 4.18.- Esquema de ligação das bobinas do motor.

O amplificador de potência está representado na figura 4.19 e é duplicado para acionar as duas fases. A tensão máxima aplicada ao motor é de 25 V.

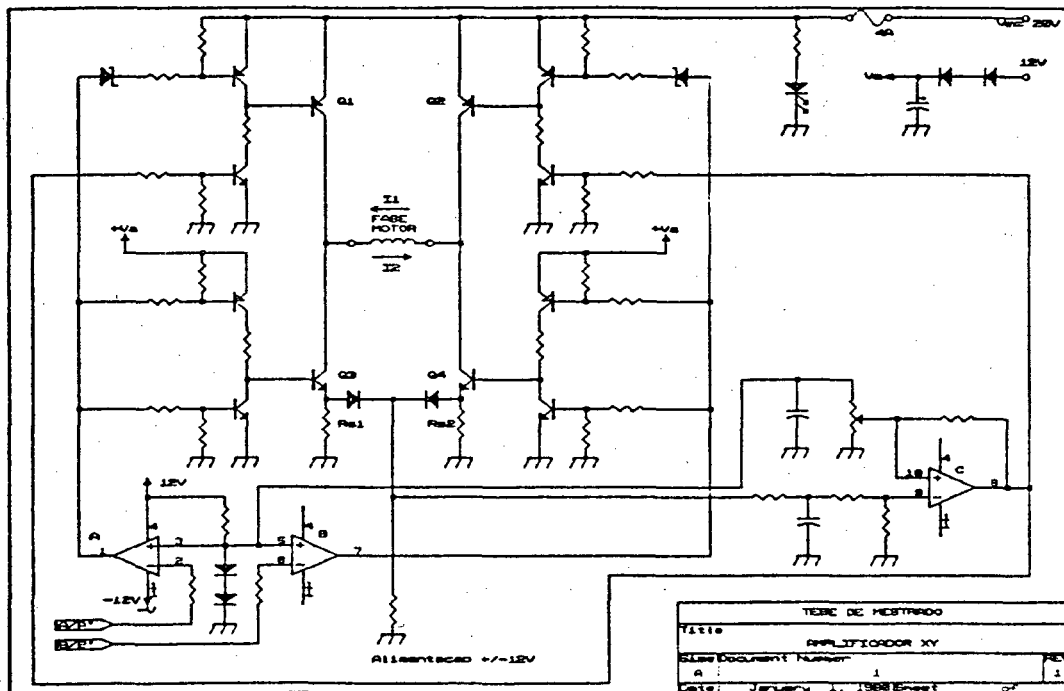


Fig. 4.19.- Amplificador de potência, mecânicas X e Y.

Para circular corrente no sentido I1, os transistores Q1 e Q4 devem conduzir, provocando uma queda de tensão em RS2, que é o resistor sensor.

Pela figura 4.18, podemos verificar que a corrente média para cada um dos motores deverá ser de: $I_n = 8A$.

Ou seja, para cada fase deverá ser em média de 4A já que o acionamento se dá em 2 fases. Os dados dos motores poderão ser verificados no apêndice I.

A corrente então no início do funcionamento deve ser levada

até um valor $I_n + AI$ maior do que 8A. Q1 ou Q2 devem então parar de conduzir devendo voltar a conduzir quando a corrente atingir um valor de:

$$I_n - AI.$$

A frequência de chaveamento será de:

$$f_c = 1/T_c = 5\text{kHz}.$$

Para que haja aumento na frequência de chaveamento deve-se utilizar transistores do tipo MOSFET. Com este tipo de transistores o chaveamento fica facilitado e pode-se chegar a frequências da ordem de 20 KHz, que fará com que se fuja da faixa de audio, reduzindo consideravelmente os ruídos provocados pela ativação da eletrônica.

4.7.3.- Eletro-eletrônica da mecânica Z

O sistema eletrônico que aciona a mecânica Z é diferente do sistema das mecânicas X e Y.

O microcomputador envia através dos bits D6 e D7, da porta Centronics, sinais de comando do sentido de rotação, e do pulso de troca de passos. Estes dados são recebidos pela lógica de passos, que dará o seqüenciamento correto para a comutação das fases do motor. O seqüenciamento será enviado ao amplificador de potência que passará os sinais ao motor.

Para detecção de passos de zero, a mecânica Z possui um sensor óptico, acoplado ao cabeçote, e ainda uma chave de fim de curso com acionamento nos dois extremos do cabeçote, para evitar que os limites de deslocamento sejam ultrapassados.

Para desligar o motor, existirá uma chave acionada externamente, chamada de libera-motor. Já quando o motor ultrapassar seus limites físicos, há a entrada chamada de rearme, utilizada para retirar o motor do estado de travamento.

Entre os sensores ópticos de fim de curso e o retorno ao microcomputador, existirá um circuito condicionador de sinal igual ao encontrado nas mecânicas X e Y.

O diagrama em blocos que representa o circuito eletrônico da mecânica Z está representado na fig. 4.20.

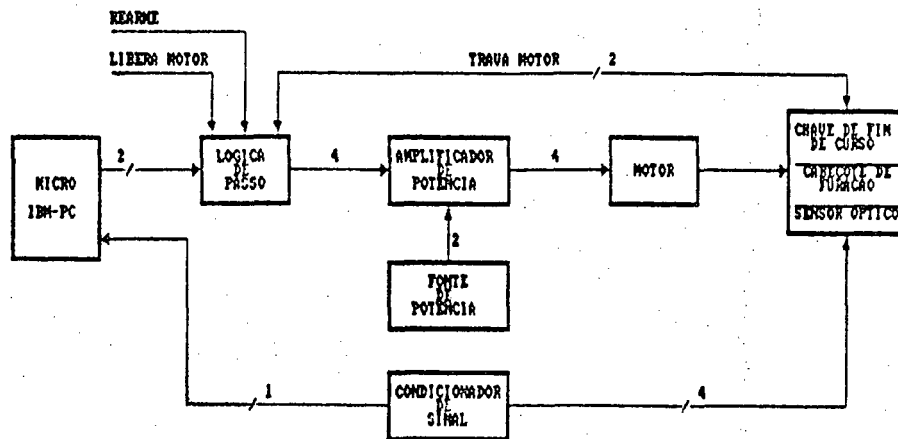


Fig. 4.20.- Diagrama em blocos do circuito eletrônico, mecânica Z

4.7.3.1- Lógica de Passo da mecânica Z.

O circuito da lógica de passo e a máquina de estados implementada pelo circuito estão representados nas figuras 4.21 e 4.22.

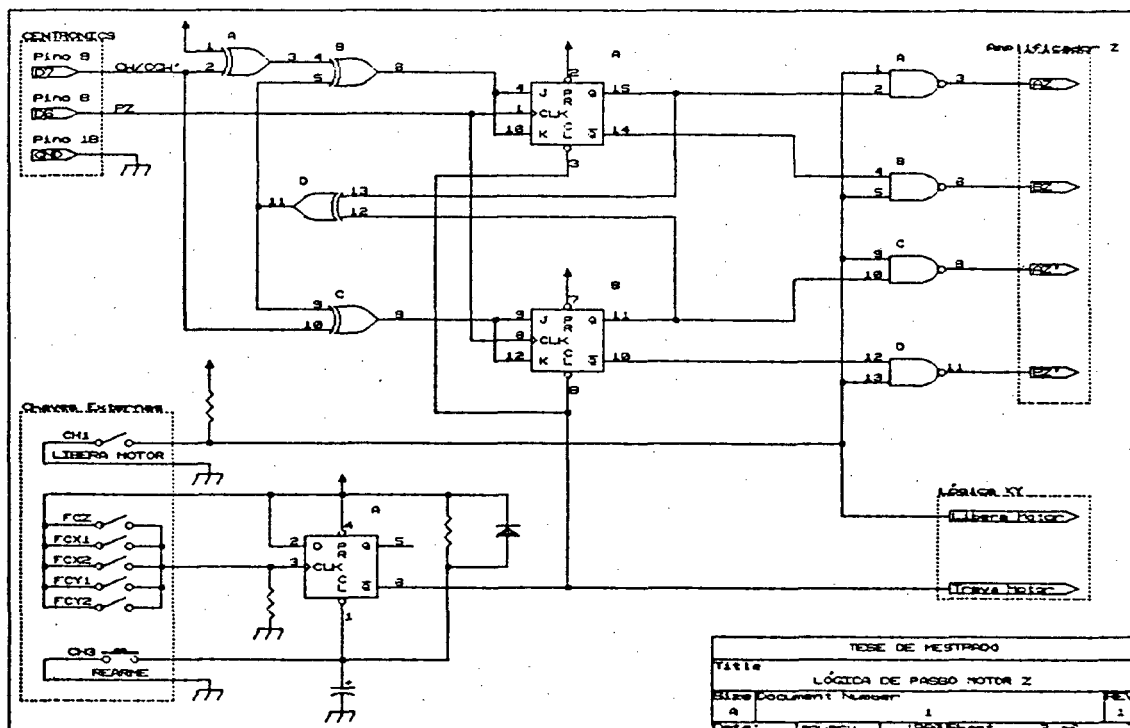


Fig. 4.21.- Circuito de lógica de passo.

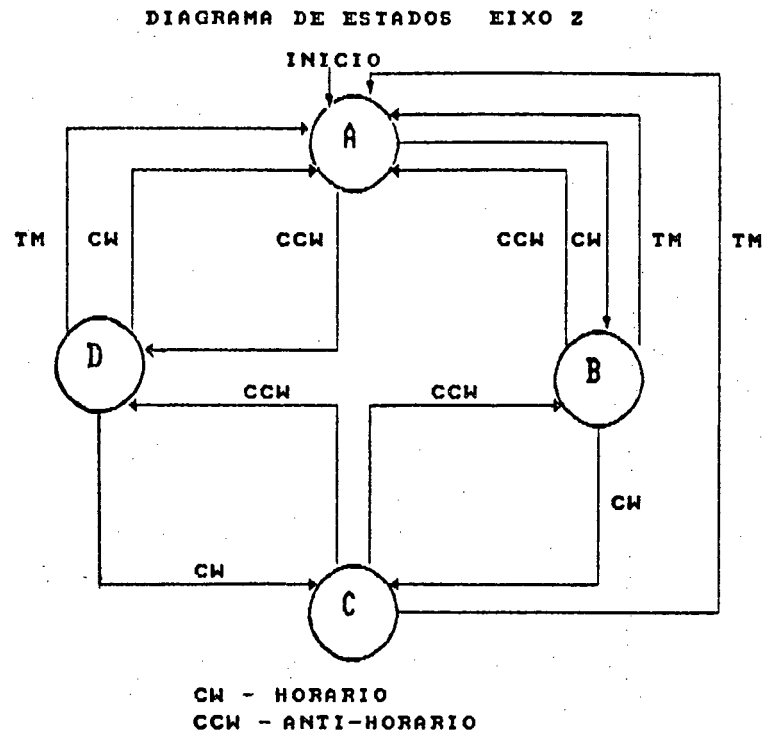


Fig. 4.22.- Máquina de estados.

A grande diferença entre a lógica de passo das mecânicas X e Y e da mecânica Z, é a de que não existe implementação da operação em meio-passo, já que o que se procura basicamente nesta mecânica é a velocidade de operação, e não uma alta resolução.

4.7.3.2- Circuito de acionamento da mecânica Z

O amplificador de potência da mecânica Z apresenta uma concepção um pouco diferenciada dos amplificadores das mecânicas X e Y. Este circuito apresenta alimentação a dois níveis de tensão descrito no capítulo 3.

Quando o transistor Q5 conduz, é aplicada uma tensão V alta, para crescimento rápido de corrente nas bobinas. Posteriormente, é aplicada uma tensão V baixa, quando o transistor Q5 é cortado e mantém o torque do motor na ausência de passo.

Os transistores Q1, Q3 e Q2, Q4 comutam as fases. A lógica, para evitar a condução simultânea das bobinas provém da lógica de passo.

O circuito da fig 4.23 é duplicado, para acionar as outras duas fases do motor.

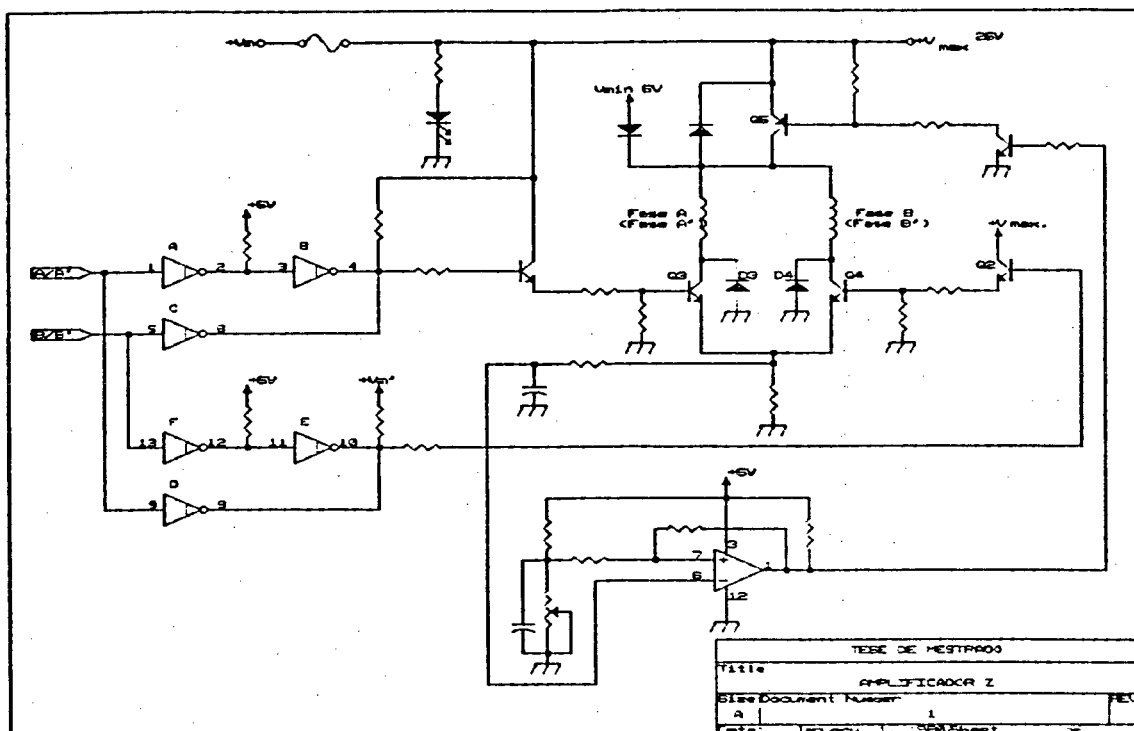


Fig. 4.23.- Amplificador de potência, mecânica Z.

O circuito de posicionamento do zero, mecânicas X, Y e Z e de proteção, é composto pelo sensor óptico, e pelo condicionador de sinal. O sinal é transformado para lógica TTL e enviado pelos bits D4 e D5 para a mecânica X, bits D6 e D7 para a mecânica Y e bit D3 e para a mecânica Z da porta Centronics, pelo programa de controle.

O circuito está representado na figura 4.24.

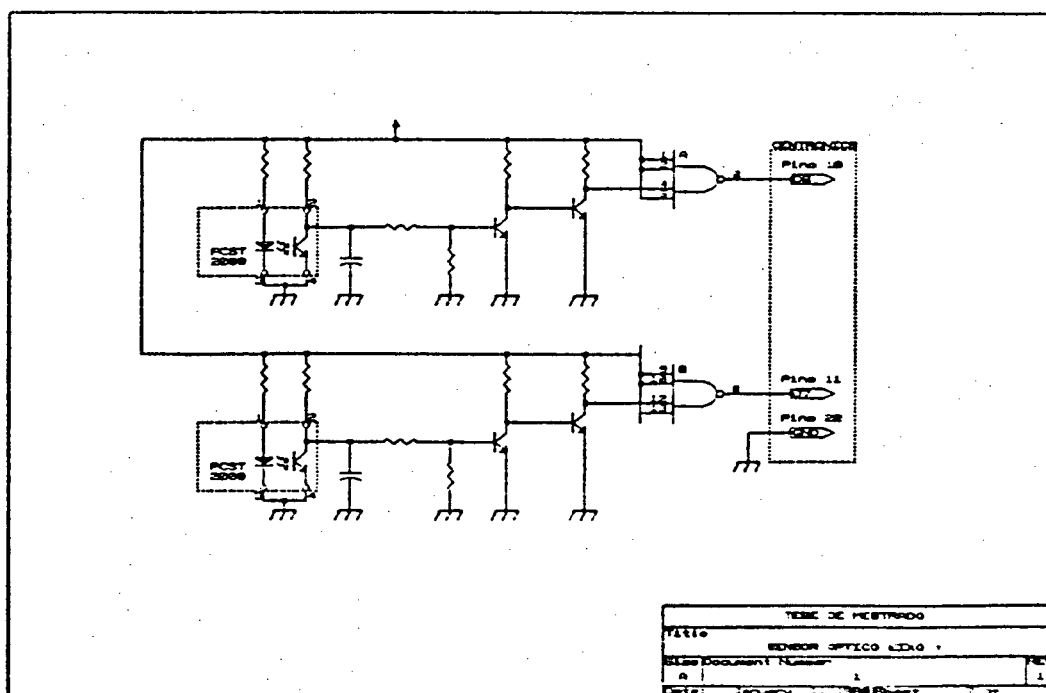


Fig. 4.24.- Sistema de proteção por sensor óptico, mecânica X.

Na mecânica Z existe apenas o sensor óptico de posicionamento do Zero. Já para as mecânicas X e Y existem dois outros sensores que servem como limitadores do curso dos eixos. Entre sensores da mecânica X, o curso será de 300 mm, e entre os sensores da mecânica Y, o curso será de 500 mm. Existe também junto aos sensores ópticos limitantes de curso um circuito, que gerará interrupção no motor, evitando que seja ultrapassado este ponto.

4.8.- Montagem do Conjunto Mecânico e Eletrônico.

Finalizando a construção da furadeira, antes dos testes, foi providenciada a montagem do conjunto. A fixação das mecânicas e da estrutura mecânica foi executada em duas etapas: na primeira, as guias foram niveladas, utilizando-se nível de precisão, relógio comparador e esquadros de precisão.

A base de granito foi montada sobre a estrutura metálica e na superfície daquela foram parafusados o conjunto mecânico e os motores. As guias foram, então, checadas isoladamente com nível de precisão, para depois se ajustar a distância entre elas, através de um relógio comparador acoplado a uma régua que desliza sobre uma das guias. O nível das duas guias é então verificado e regulado.

Para o ajuste da ortogonalidade formada entre as mecânicas, utilizou-se, nesta primeira etapa, de esquadros metálicos de precisão. Quando todo o conjunto foi levado para testes estáticos, uma segunda regulagem mais precisa se fez necessária.

Foi feita então a montagem da furadeira sobre uma máquina de medir coordenadas e então o ajuste foi feito aproveitando-se o sistema padrão da própria máquina de medir coordenadas. Na checagem de cada uma das mecânicas da furadeira, foi utilizado o apalpador do sistema padrão de medição e movimentado uma das mecânicas desta, enquanto as outras duas eram fixadas.

O ajuste na máquina pôde ser feito em todas as mecânicas da furadeira, em quase todos os sentidos, já que se trata de um protótipo. Já o conjunto eletrônico, formado pelos amplificadores de potência, lógicas de passo e condicionadores de sinal foram acondicionados em dois gabinetes de alumínio, tipo rack com (280x310x100mm) e o conversor de alta frequência, que aciona o micro motor de corrente alternada, foi colocado em um outro gabinete separado.

Para fiação foi utilizado cabo tipo telefone para a mecânica Z e cabos de impressora serial, multifios, para as mecânicas X e Y.

Depois desta montagem, foi desenvolvida a programação da furadeira, tratada no item seguinte.

4.9.- Programação da Furadeira

Após a montagem do conjunto mecânico e eletrônico, realizou-se a programação do microcomputador IBM-PC, necessária para comandar a furadeira utilizando o microcomputador como um comando numérico computadorizado. A programação foi realizada utilizando-se a linguagem Turbo Pascal, versão 5.0, que reduziu em muito o tamanho do programa. Não houve a necessidade da utilização da linguagem Assembler, que tornaria o microcomputador mais rápido, já que a velocidade alcançada com o motor de passo está dentro da previsão inicial do projeto. Se forem necessárias, as rotinas de interrupção dos motores e geração de passos poderão futuramente ter suas programações passadas para a linguagem Assembler. A entrada de dados no programa é feita através de disquetes em dois drives, sendo que um contém o programa chave e o segundo, os programas em códigos CNC (vide apêndice II).

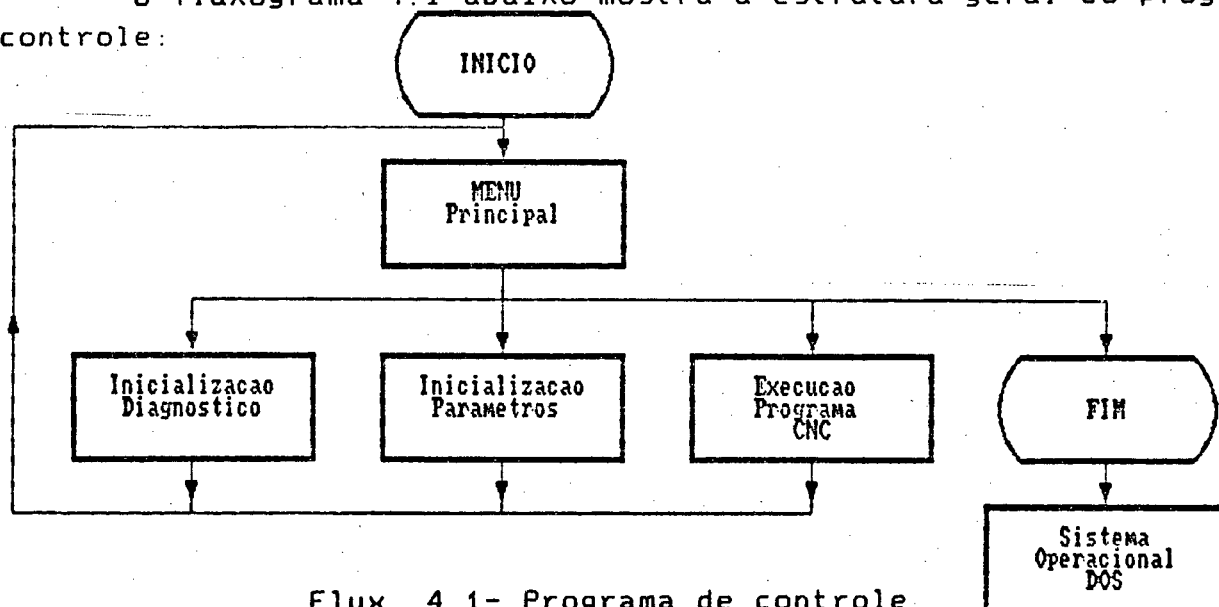
Para digitação dos códigos, é utilizado o teclado do próprio microcomputador.

O programa é composto de um menu principal que contém 4 opções para o operador da furadeira. Aparecerá na tela do microcomputador, após ser instalado o programa, as seguintes informações:

Programa de controle CNC.

Opções: 1.....Inicialização/diagnóstico
2.....Inicialização Parâmetros
3.....Execução programa CNC
4.....Fim.

O fluxograma 4.1 abaixo mostra a estrutura geral do programa de controle:



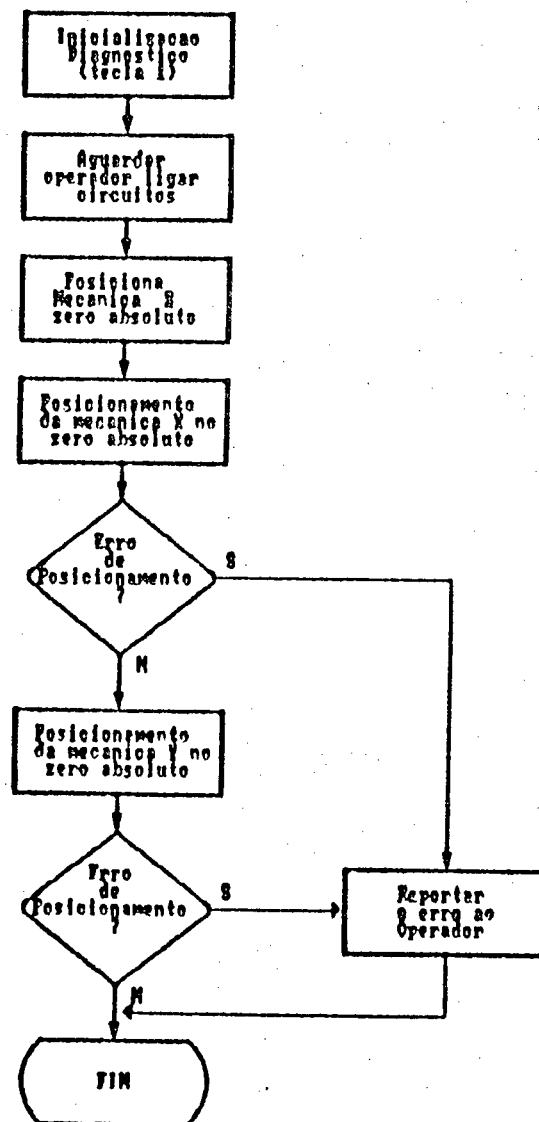
Flux. 4.1- Programa de controle

O programa desenvolvido é bastante simples e pode-se verificar que a operação da máquina também será.

Dá-se agora uma explicação sucinta sobre cada uma das divisões do programa, a partir do menu principal.

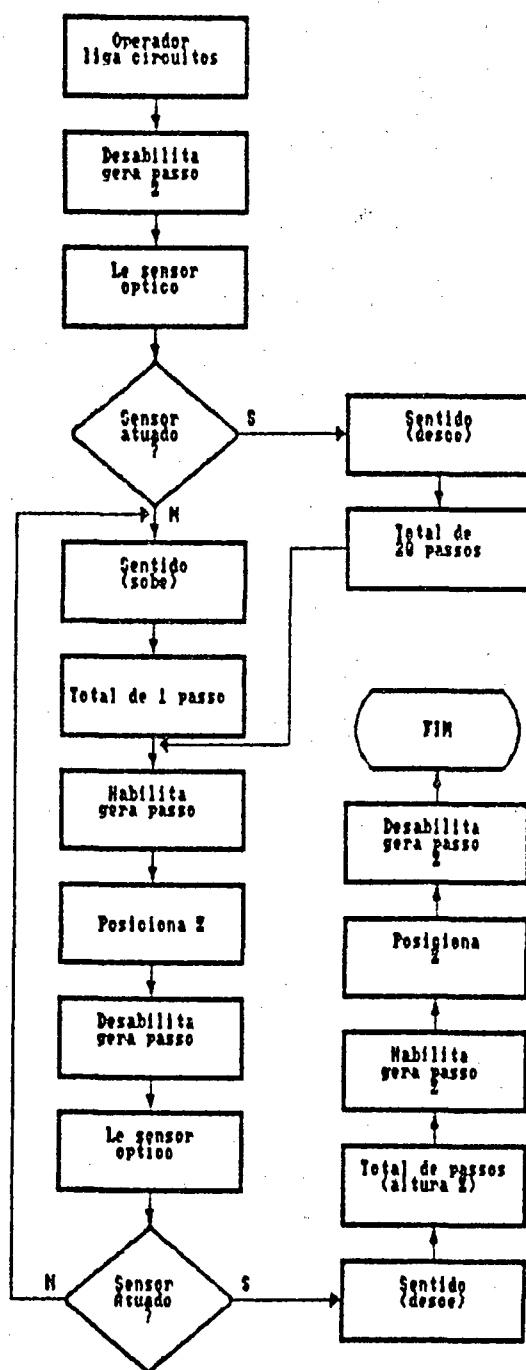
4.9.1.- Inicialização Diagnóstico.

Este programa será executado sempre que a máquina for acionada para testar todos os fins de curso, sentidos de deslocamento e as distâncias totais percorridas. Após a opção do operador pela tecla 1, de Inicialização Diagnóstico, serão testados as mecânicas, iniciando pela mecânica Z, tal como no fluxograma 4.2 abaixo:

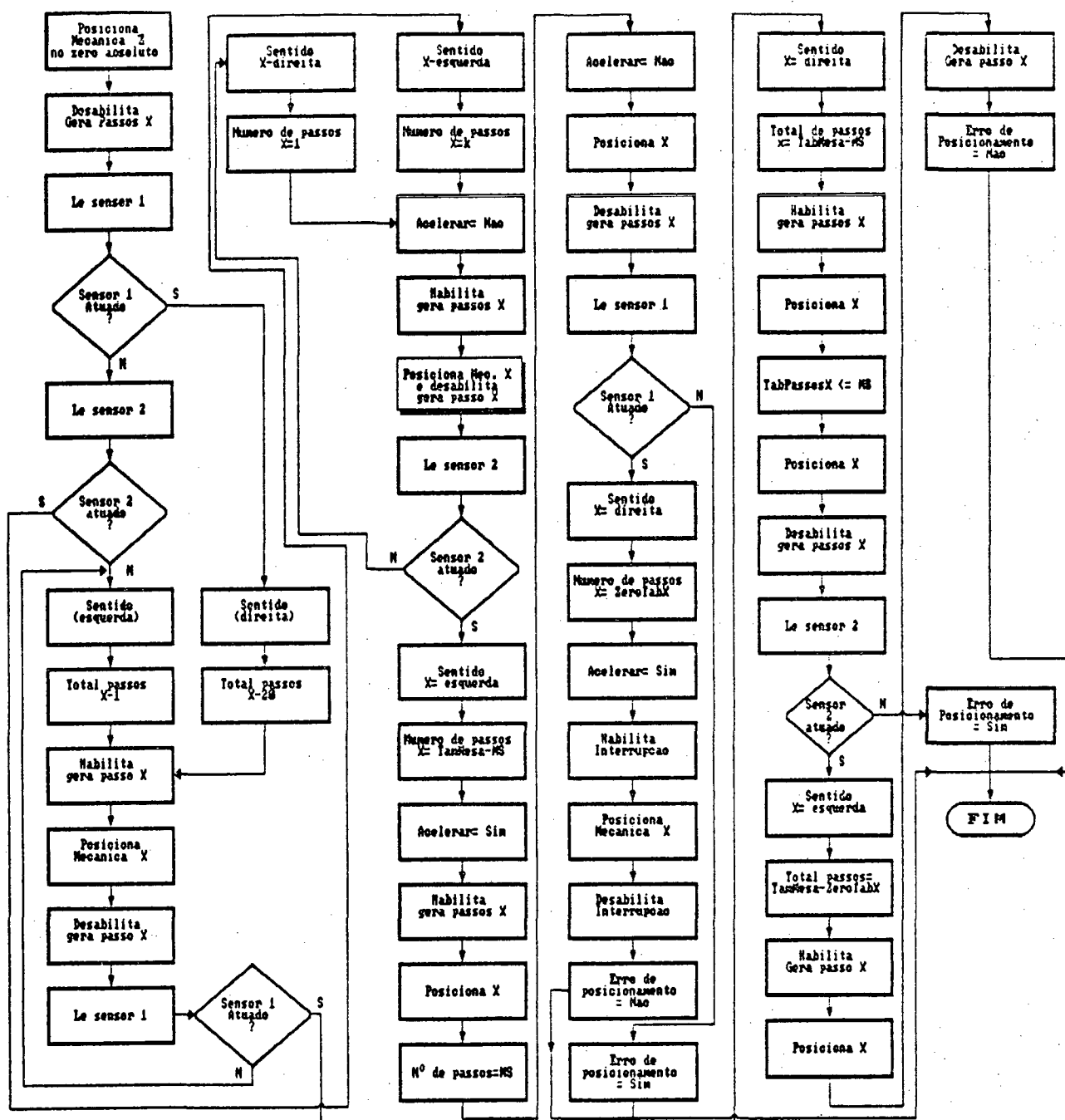


Flux.4.2- Inicialização Diagnóstico

Primeiro o programa aguarda que o operador ligue todos os circuitos de acionamento da furadeira, sendo isto indicado através do visor do microcomputador. Quando todos os circuitos já estiverem ligados, o operador pressionará a tecla Enter e então será feito o posicionamento do zero absoluto da mecânica Z. Veja fluxograma 4.3 abaixo:



Flux.4.3- Posicionamento no zero absoluto



Flux.4.4- Verificação das mecânicas

A lingueta, estando inserida internamente ao sensor óptico, indica que o mesmo está atuado. Como necessita-se de precisão no posicionamento da mecânica, se o sensor estiver atuado, faz-se a movimentação da mecânica para que a mesma se afaste 20 passos do sensor. Então, uma aproximação passo à passo é feita junto com a

leitura do sensor óptico. Caso o mesmo não esteja atuado, esta aproximação de subida é feita passo-a-passo diretamente até que o mesmo seja alcançado pela lingueta. Um movimento no sentido inverso de um número de passos determinados pelo operador, colocará então a mecânica Z em ponto de operação. Terminada a verificação desta mecânica, as outras duas serão analisadas. O princípio da verificação é igual para as duas mecânicas, X e Y, e está apresentado no fluxograma 4.4.

Como existem dois sensores em cada uma destas mecânicas, o programa procura verificar o funcionamento de cada um deles, o sentido de giro do motor e algum erro de posicionamento.

Primeiramente é feita uma leitura dos dois sensores da mecânica. Se o sensor 1 estiver atuado, é feita uma movimentação, no sentido da direita, de 20 passos e, em seguida, o motor é movimentado passo-a-passo no sentido oposto, fazendo-se a leitura do sensor a cada passo até o momento de ativação. É feita então a movimentação do motor permitindo que a mesa se movimente no sentido do sensor 2. É dado então um número de passos suficiente para deslocar a mesa de uma distância igual ao comprimento da guia menos uma margem de segurança, denominada MS. É feita, então, a movimentação da mesa de uma distância igual à MS, passo a passo. Faz-se a leitura do sensor, verificando se o mesmo está atuado. Se estiver, o programa indica que há erro de posicionamento, do contrário, o programa indicará que não há erro de posicionamento. Caso haja atuação do sensor 2, o processo será o mesmo, modificando-se apenas o sentido de movimentação da mesa.

Em último caso, se nenhum dos dois sensores estiver atuado na leitura preliminar, o processo se dará no sentido de se atuar primeiramente o sensor nº1, sendo depois executado todo o processo descrito anteriormente.

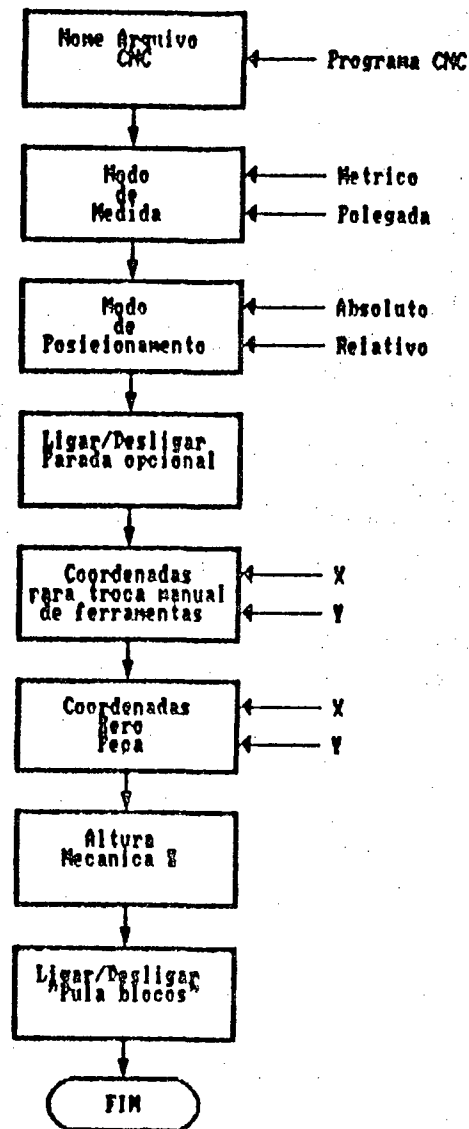
Após esta verificação, deverá ser acionada a tecla nº2, que aparece na tela do menu principal e que vem a ser os parâmetros de inicialização.

4.9.2.- Parâmetros de Inicialização.

Antes do início da execução do programa de CNC, é necessária a escolha de alguns parâmetros para que os comandos possam ser compreendidos.

Primeiramente, é selecionado o nome do programa CNC a ser executado. Posteriormente, são escolhidos o modo de medida métrica ou em polegada, o modo de posicionamento absoluto ou relativo, o desligamento ou não da parada opcional, as coordenadas X e Y para troca manual de ferramentas, as coordenadas para zero-peça, a altura da mecânica Z e o desligamento ou não do comando "pula bloco". Depois disto, poderá ser executado o programa CNC. O fluxograma 4.5 a seguir

mostra o que foi explicado:



Flux.4.5- Parâmetros de Inicialização

4.9.3.- Execução do programa CNC.

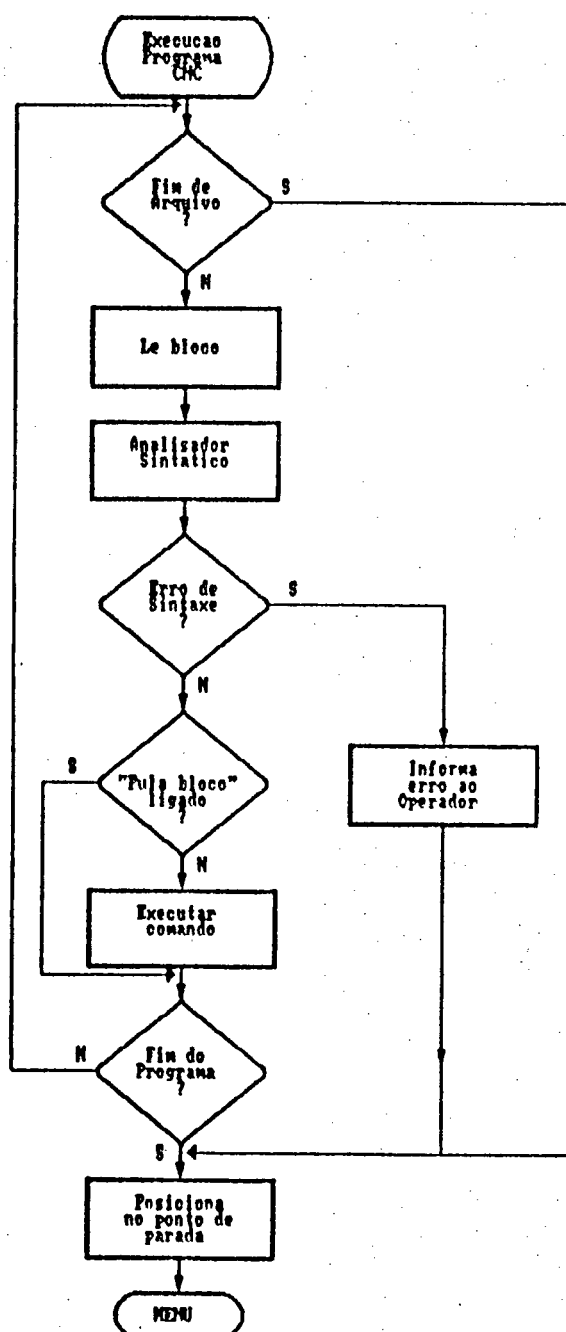
Os programas CNC serão feitos utilizando-se códigos ASCII para furação e fresagem. Logicamente, na primeira fase de desenvolvimento do software nem todos os comandos estarão implementados, mas o funcionamento básico da máquina poderá ser alcançado. Os códigos ASCII utilizados e os não utilizados no programa básico estão descritos no Apêndice II.

A intenção, quando todos os comandos estiverem implementados, é de que os arquivos gerados pelos programas de CAD/CAM possam ser interpretados, permitindo que as placas sejam furadas diretamente. O fluxograma 4.6 de execução do programa CNC está

representado a seguir. Nele, pode-se verificar que é feita uma leitura bloco a bloco analisando-se os erros de sintaxe existentes no programa. Não havendo erros, o programa é executado verificando-se anteriormente se o comando de "pula bloco" está ou não ativado.

Caso seja verificado algum problema de sintaxe ou o arquivo tenha chegado ao seu final, o programa levará novamente ao menu indicando o bloco com erro.

A entrada dos programas peça de CNC na máquina serão feitos através de disquetes colocados em um drive, enquanto o outro drive do microcomputador estará o programa máquina ou em Winchester. Para digitar novos programas peça, poderá ser usado o teclado do próprio microcomputador ou eventualmente buscar dados no CAD.



Flux.4.6- Execução do programa CNC

CAPÍTULO V

ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS

5.1.- Introdução

Com a conclusão do projeto e posterior execução e montagem da furadeira com comando numérico para PCIs, foram feitos testes com o intuito de se levantar as características estáticas e dinâmicas do protótipo de máquina operatriz desenvolvida. Com a execução destes ensaios, foram determinadas as características da máquina, além de permitir a discussão sobre os problemas encontrados e soluções futuras para melhoria do conjunto.

Os ensaios tiveram sua aplicação prejudicada devido ao atraso no cronograma da máquina, motivado por problemas de importação dos fusos de esferas recirculantes das mecânicas X e Y, que até na data de concepção do projeto da furadeira não existiam no mercado nacional.

Foram realizados ensaios estáticos de retilineidade, posicionamento e ortogonalidade das trajetórias da mecânica X, que possui um sistema mecânico semelhante ao da mecânica Y, e da mecânica Z, além de ensaios de rugosidade e dureza das guias.

Dinamicamente, foram analisadas a otimização da rampa de aceleração, as curvas de resposta dos motores no domínio do tempo, as curvas de torque x velocidade dos motores das mecânicas X, Y e Z acionados através de seus respectivos conjuntos eletro-eletrônicos desenvolvidos neste trabalho.

Foram analisadas ainda a perpendicularidade da descida da mecânica Z em funcionamento sobre a placa e a excentricidade verificada no cabeçote de furação em funcionamento.

5.2.- Ensaios Estáticos

Os ensaios geométricos das máquinas-ferramentas visam a verificação dos elementos quanto a sua micro e macro-geometria. Foram feitos ensaios com sentido de verificar a validade da utilização de determinado tipo construtivo quanto à forma ou material no desenvolvimento mecânico e também analisar os desvios mecânicos na trajetória da máquina.

5.2.1.- Ensaio de Rugosidade das Guias

As superfícies, por mais perfeitas que sejam, apresentam um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular, que tendem a formar um padrão ou textura provocados pelo método de usinagem empregado para sua obtenção.

A rugosidade é formada pelos sulcos deixados pelo agente que atacou a superfície no processo de usinagem e se encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência dos movimentos da máquina, deformação pelo tratamento térmico, etc. A rugosidade é um erro de textura primária, considerado também como um erro micro-geométrico determinado com o auxílio de aparelhos eletrônicos que definem o perfil numérica ou graficamente. Dentre os dois sistemas de medição da rugosidade, que são o sistema "E" ou da envolvente e o sistema "M" ou da linha média, optou-se pelo sistema da linha média, porque pelo método da evolvente a linha de referência é obtida através da evolvente do círculo, e a sua maior dificuldade reside na definição do perfil efetivo, que deve ser ampliado por igual nas duas direções. Dentro da metrologia de superfície, medimos sempre os desvios de um corpo em relação à uma forma ideal.

No sistema "M", a linha de referência utilizada é a linha média e se define como a linha localizada na parte média do perfil de rugosidade dentro dos limites do comprimento de amostragem, de modo que a soma das áreas abaixo dela seja igual à soma das áreas geradas acima da linha. Já o comprimento de amostragem deverá ser dimensionado proporcionalmente ao grau de acabamento, de forma que se possa avaliar a rugosidade e excluir os problemas inerentes à ondulação.

Para perfis aperiódicos, resultantes da fresagem, esmerilhamento e retificação teremos um comprimento de amostragem de 0,25 mm para rugosidade de 0 até 0,5 μ m. Já os parâmetros de medição de rugosidade baseados na linha média "M" são agrupados em três classes: os que se baseiam na medida da profundidade da rugosidade, em medidas horizontais e em medidas proporcionais.

Dentro dos sistemas baseados na profundidade, o método que será utilizado é o da profundidade total de rugosidade ou método "Rt". Este método é empregado para medida de superfícies de vedação, assento de anéis de vedação e superfícies dinamicamente carregadas. O ensaio é mais rígido na avaliação, e quando o equipamento fornece o gráfico da superfície, é mais fácil de obter do que R_{\max} . O comprimento avaliado deverá ser igual ao comprimento da peça, o que é bastante interessante do ponto de vista da avaliação das guias, que deverão ter um grau de acabamento bastante apurado em toda sua extensão. O ensaio foi efetuado utilizando-se uma máquina universal de medida de textura de superfície, da marca Kosaka, com as seguintes características:

- precisão de retilidade: 0,3mm/100mm
- faixa de medição: 0,01-600mm
- ampliação: vertical 100-10000 vezes
horizontal 10-500 vezes

Utilizando um comprimento de perfil aperiódico igual a 0,25 mm e ensaiando-se uma das guias componentes do posicionador Z, já que todas as guias sofreram o mesmo tipo de tratamento térmico e usinagem, fizemos medição de rugosidade em todo o seu comprimento, que no caso é de 200mm. Mostra-se um gráfico esquemático na fig. 5.1, que indica a rugosidade R_t encontrada.

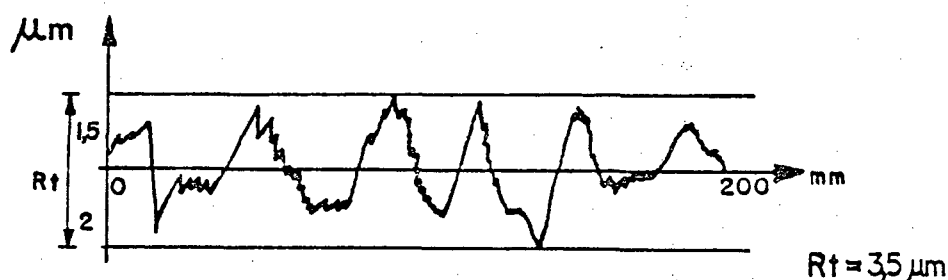


Fig. 5.1.- Gráfico de rugosidade para o posicionador Z.

Pode-se verificar que o valor de R_t encontrado está dentro das especificações de projeto. Como a usinagem dos outros foi feita utilizando-se a mesma retífica de precisão, pode-se concluir que os resultados também estarão dentro do esperado.

5.2.2.- Ensaio de Dureza das Guias

Geralmente, em usinagem mecânica, há necessidade de se conhecer a dureza do metal para que se determine a velocidade de corte ou para concluir-se algum parâmetro sobre a utilização de determinado tipo de material.

O método de medida da dureza mais indicado neste caso foi o Rockwell, norma DIN 50103, que é baseado na profundidade de penetração de uma ponta, que será um cone de diamante com ângulo de 120 graus /29//22//64/. Quando o ensaio for do tipo Rockwell C, pode-se aplicá-lo ao campo dos aços temperados, material o qual queremos estudar. Existem dois grupos básicos dos ensaios Rockwell: o Rockwell comum e o Rockwell superficial. Devemos ainda considerar que o primeiro ensaio não deve ter seu resultado considerado em virtude do penetrador não estar bem assentado em seu alojamento e cada aplicação de carga deverá durar de 6 a 10 segundos para materiais temperados (duros).

Utilizou-se para o ensaio uma máquina de ensaio de dureza da marca Wilson, modelo 3JR, com escalas para ensaios HC e HB.

Foram efetuadas 20 medições sobre uma das guias para análise da dureza ao redor de seu diâmetro e ao longo de seu comprimento. As medições foram feitas em diferentes áreas da guia e a dureza não deveria ser menor do que 60 Rockwell C /17/. Este ensaio tornou-se necessário em nosso caso, tendo em vista a necessidade de alta dureza das guias para permitir a utilização de rolamentos lineares, sem problema de diminuição da capacidade de carga dos mesmos. Foi utilizada pré-carga de 10 kg antes de cada medição. Os resultados estão nas tabelas 5.1 e 5.2 abaixo:

Nº	Escala	Pré-carga [kg]	Carga [kg]	Penetrador (Cone Diamante)	Dureza
1	HC	10	150	1200	60,5
2	HC	10	150	1200	61,8
3	HC	10	150	1200	62,3
4	HC	10	150	1200	63,6
5	HC	10	150	1200	62,5
6	HC	10	150	1200	61,4
7	HC	10	150	1200	60,0
8	HC	10	150	1200	58,8
9	HC	10	150	1200	61,1
10	HC	10	150	1200	62,5

Tab. 5.2.- Dureza ao redor do diâmetro da barra.

Nº	Escala	Pré-carga [kg]	Carga [kg]	Penetrador (Cone Diamante)	Dureza
1	HC	10	150	1200	60,3
2	HC	10	150	1200	59,4
3	HC	10	150	1200	62,0
4	HC	10	150	1200	63,2
5	HC	10	150	1200	60,5
6	HC	10	150	1200	61,3
7	HC	10	150	1200	60,5
8	HC	10	150	1200	63,3
9	HC	10	150	1200	62,3
10	HC	10	150	1200	61,5

Tab. 5.3.- Dureza ao longo do comprimento.

A tabela 5.1 nos mostra as durezas encontradas ao redor do diâmetro da barra e a tabela 5.2, as durezas ao longo do seu comprimento. Verifica-se que a dureza, na média, foi maior do que 60 Rockwell C, o que torna a barra bastante indicada para a utilização de rolamentos lineares. Além disso, pode-se comprovar, com este ensaio, que o tratamento térmico foi bem executado, já que os resultados se aproximam muito uns dos outros quanto aos valores.

5.2.3.- Ensaios de Posicionamento, Retilidade e Ortogonalidade das mecânicas X, Y e Z da Furadeira

Os ensaios de posicionamento e retilidade servem para análise estática dos desvios de trajetórias.

O equipamento padrão de medição utilizado para realização dos ensaios de posicionamento e retilineidade foi uma Máquina de Medir Coordenadas, pertencente ao Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), que através de acordo com o CEFET-PR, permitiu sua utilização de maneira a permitir seu nivelamento utilizando-se como padrão a base de granito da Máquina de medir coordenadas.

Esta máquina de medir coordenadas, que é nosso sistema padrão de medição, possui as seguintes características:

Fabricante: MITUTOYO

Capacidade de medição: X: 800mm
Y: 1500mm
Z: 550mm

Construção: utiliza nos eixos X e Y o sistema de rolamento a ar, e no eixo Z, rolamentos de esfera.

Precisão: (por eixo) $(4+8L/1000)\mu\text{m}$

Resolução: $1\mu\text{m}$

Repetibilidade: $2\mu\text{m}$

Modelo: B-241

Sistema Micropak 21

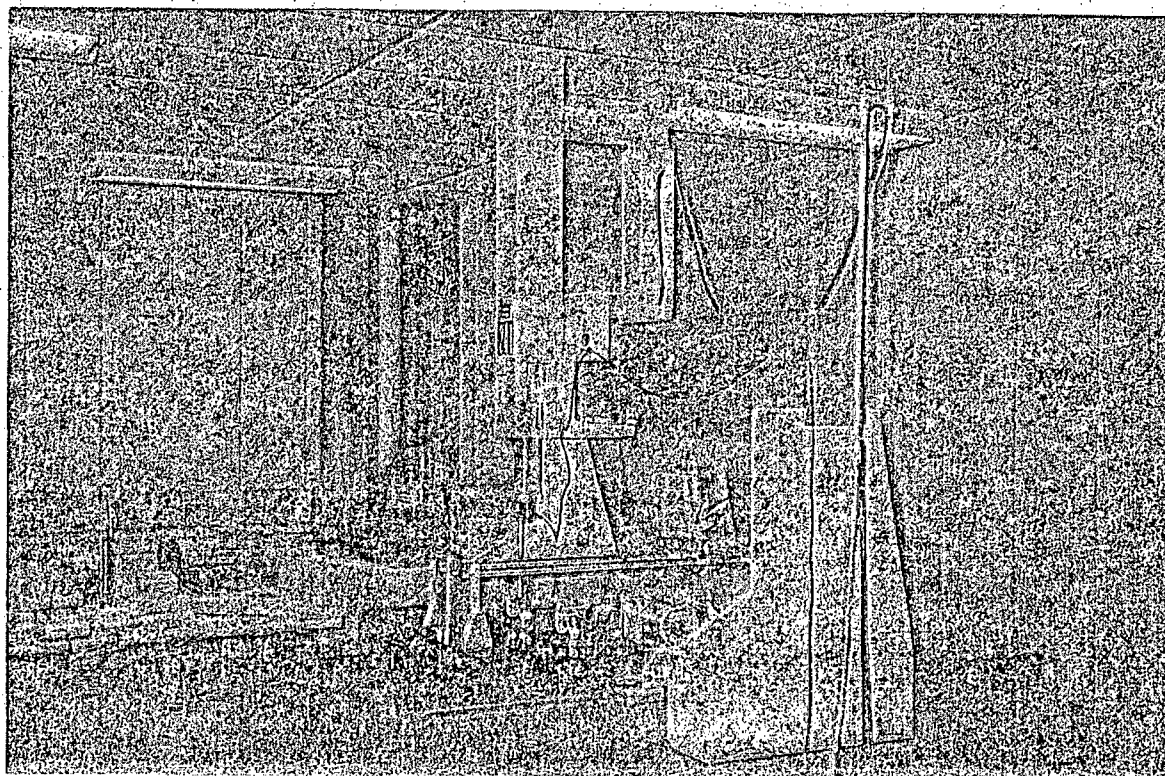


Fig. 5.2- Fixação da furadeira sobre a máquina de medir

A furadeira foi fixada sobre a máquina de medir Fig.5.2, de maneira a poder ser utilizada para os dois ensaios.

Foi nivelada e alinhada a trajetória da mecânica X, realizando-se primeiramente o ensaio para o posicionamento das três mecânicas e, posteriormente, o ensaio de retilineidade.

Foram feitas medições em quatro ciclos, sendo que, no intervalo de cada uma destas medições, eram feitos cinco ciclos completos. As posições de medição foram definidas e a medição foi efetuada através do apalpador da máquina de medir coordenadas que tocava sempre no mesmo ponto.

Com a extensão dos ciclos intermediários aos de medição, procurou-se verificar algum erro decorrente do projeto, que só pode ser notado quando da movimentação da mesa num número maior de vezes e também a repetibilidade dos resultados.

Foram realizados ensaios nos dois sentidos para verificação da histerese de posicionamento Tab.5.3.

Mecânica X		Mecânica Y		Mecânica Z	
Posição de medição sentido crescente		Posição de medição sentido crescente		Posição de medição sentido crescente	
1	0	1	0	1	0,00
2	40	2	40	2	3,175
3	80	3	80	3	6,350
4	120	4	120	4	9,525
5	160	5	160	5	12,700
6	200	6	200	6	15,875
7	240	7	240	7	19,050
8	280	8	280	8	22,225
9	300	9	300		
		10	360		
		11	400		
		12	440		
		13	480		
		14	500		
sentido decrescente mesmas posições		sentido decrescente mesmas posições		sentido decrescente mesmas posições	

Tab. 5.3.- Posições de medição para as mecânicas.

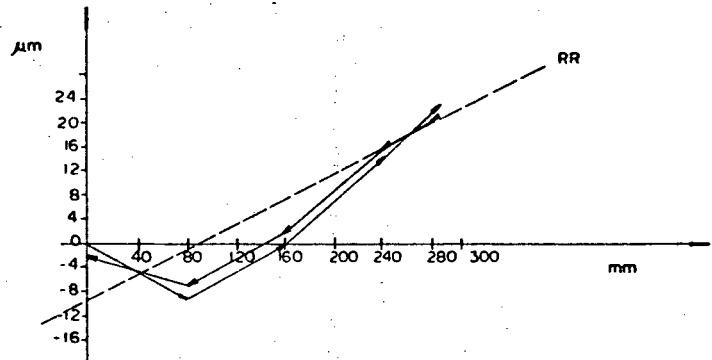
As condições ambientes para o ensaio foram de temperatura à 20 graus Celsius e umidade relativa do ar de 65%.

Os dados brutos foram retirados através da utilização de um microcomputador e os mesmos foram processados obtendo-se com isto, o posicionamento real, e o erro de posicionamento igual a diferença entre posicionamento ideal e real. Já a histerese foi obtida diretamente do gráfico dos erros. A reta de referência dos ensaios foi obtida matematicamente através do método dos mínimos quadrados.

A tabela 5.4 apresenta os resultados processados da mecânica X e a fig. 5.3, o gráfico dos erros do mesmo ensaio.

Com estes, pode-se determinar que a histerese máxima é igual a 3 μm . Pela reta de referência obtida por MMQ, verifica-se que o erro médio é igual a +7 μm e o erro máximo de posicionamento vem a ser igual a +23 μm .

Nº	Pos. ideal [mm]	P. real [mm]	Erro [mm]
1	0	0	0
2	40	39,996	-4
3	80	79,991	-9
4	120	119,995	5
5	160	160,000	0
6	200	200,006	6
7	240	240,014	14
8	280	280,021	21
9	300	300,023	23
10	300	300,021	21
11	280	280,019	19
12	240	240,016	16
13	200	200,008	8
14	160	160,002	-2
15	120	119,997	-3
16	80	79,993	-7
17	40	39,996	-4
18	0	0,002	-2



Tab. 5.4.- Tabela de dados processados, ensaio X.

Fig. 5.3.- Gráfico dos erros, ensaio X.

Pela tabela de dados processados 5.5 e pelo gráfico de erros (fig. 5.4) da mecânica Y, verifica-se que o valor da histerese máxima é igual a 7 μm . O erro de posicionamento médio é igual a 25 μm e o erro de posicionamento máximo é igual a 48 μm .

Nº	Pos. ideal [mm]	P. real [mm]	Erro [mm]
1	0	0	0
2	40	40,005	5
3	80	80,007	7
4	120	120,011	11
5	160	160,016	16
6	200	200,026	26
7	240	240,031	31
8	280	280,026	26
9	320	320,030	30
10	360	360,032	32
11	400	400,034	34
12	440	440,039	39
13	480	480,048	48
14	500	500,048	48
15	500	500,047	47
16	480	480,047	47
17	440	440,038	38
18	400	400,034	34
19	360	360,030	30
20	320	320,035	35
21	280	280,031	31
22	240	240,036	36
23	200	200,025	25
24	160	160,020	20
25	120	120,010	10
26	80	80,007	7
27	40	40,007	7
28	0	-0,002	-2

Tab. 5.5.- Tabela de dados processados, ensaio Y.

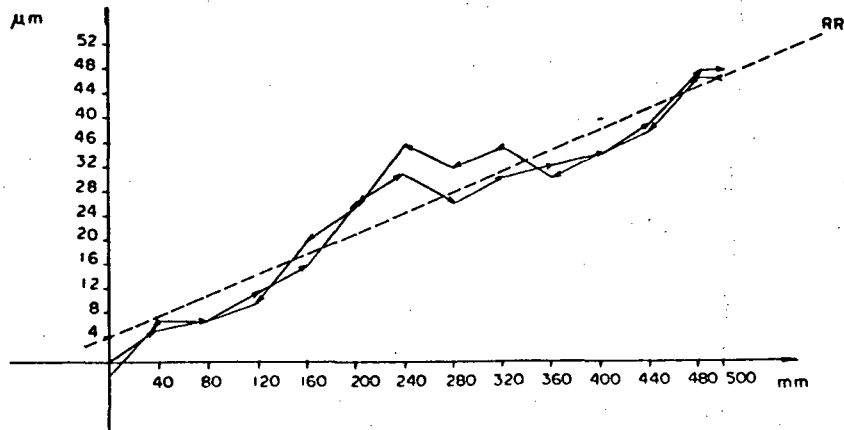


Fig. 5.4.- Gráfico dos erros, ensaio Y.

Finalmente, para a mecânica Z, temos a tabela 5.6 e o gráfico dos erros na fig. 5.5 e, com estes, verificamos ser o erro máximo de posicionamento igual a 9 μm e o erro médio, pela reta de referência, é igual a 2,5 μm .

Nº	Pos. ideal [mm]	P.real [mm]	Erro [mm]
1	0,000	0,0	0
2	3,175	3,176	1
3	6,350	6,348	-2
4	9,525	9,529	4
5	12,700	12,706	6
6	15,875	15,880	5
7	19,050	19,057	7
8	22,225	22,234	9
9	22,225	22,232	7
10	19,050	19,055	5
11	15,875	15,877	2
12	12,700	12,701	1
13	9,525	9,525	0
14	6,350	6,351	1
15	3,175	3,175	0
16	0,000	-0,002	-2

Tab. 5.6.- Tabela de dados processados, ensaio Z.

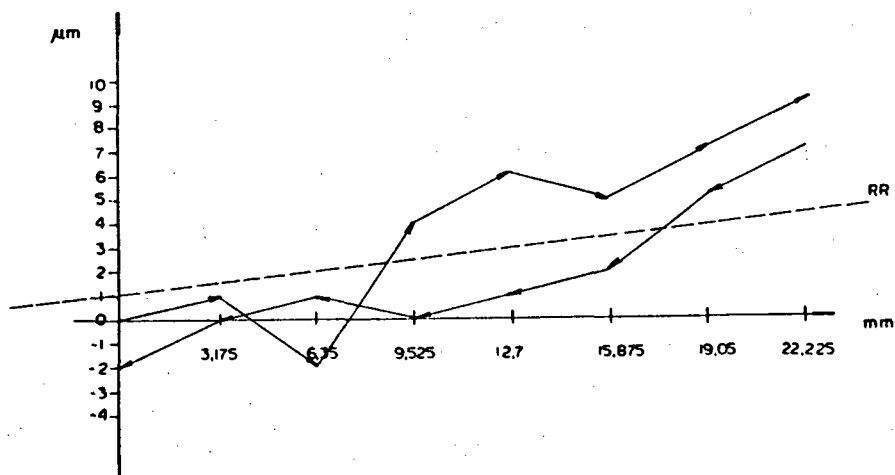


Fig. 5.5.- Gráfico dos erros, ensaio Z.

Os resultados apresentados podem ser analisados:

-Os motores de passo por si só possuem um erro de passo médio de 5%, o que induz um erro de $1\text{ }\mu\text{m}$ nas mecânicas X e Y e um erro de menos de $1\text{ }\mu\text{m}$ na mecânica Z;

-Todas as mecânicas apresentaram resultados dentro dos projetados quanto ao posicionamento, (com excessão da mecânica Y) o que atende as exigências da aplicação;

-O erro de posicionamento da mecânica Y está um pouco acima do que havia sido projetado. Isto se deveu a um erro apresentado pelo fuso acima do especificado.

O erro de posicionamento da mecânica Y poderá ser modificado posteriormente na programação da máquina desde que ensaios mais acurados sejam efetuados neste fuso.

Depois de efetuados os ensaios de posicionamento das três mecânicas, parte-se para o segundo ensaio, que é o ensaio de retilidade das mecânicas, utilizando a mesma montagem anterior. Neste caso obtiveram-se valores para os seis ensaios realizados (dois por mecânica) para as mesmas posições utilizadas no ensaio de posicionamento vistos na tabela 5.7:

Mecânica X	Mecânica Y	Mecânica Z
Para Y=qualquer Para Z=qualquer Posições de medição	Para X=qualquer Para Z= 17,7mm Posições de medição	Para X=qualquer Para Y= 240mm Posições de medição
0	0	0,000
40	40	3,175
80	80	6,350
120	120	9,525
160	160	12,700
200	200	15,875
240	240	19,050
280	280	22,225
300	320	
	360	
	400	
	440	
	480	
	500	

Tab. 5.7.- Posição de medição para as mecânicas no ensaio de retilidade.

Do mesmo modo que no ensaio de posicionamento, foram realizadas medições nos dois sentidos e se obtiveram resultados brutos que foram processados e colocados em tabelas.

Também se obteve a inclinação e a histerese através dos gráficos dos erros de afastamento. A reta de referência é obtida nestes gráficos pelo método dos mínimos quadrados, tal como no ensaio anterior. Foram efetuadas, para cada ensaio, quatro percursos

completos (sentidos crescente e decrescente).

O ensaio de retilineidade da mecânica X (Tab.5.8), composto oito pontos verificados em quatro ciclos, apresentou como resultados um erro de retilineidade máximo de $14\text{ }\mu\text{m}$, um erro de retilineidade positiva $Er+$ igual a $10\text{ }\mu\text{m}$ e um erro de retilineidade negativa igual a $-4\text{ }\mu\text{m}$ e um erro de alinhamento igual a $20\text{ }\mu\text{m/m}$.

Nº	Posição [mm]	Afastamento [μm]
1	0	0
2	40	5
3	80	11
4	120	8
5	160	6
6	200	0
7	240	-6
8	280	-3
9	300	-4
10	300	2
11	280	1
12	240	-7
13	200	-4
14	160	-2
15	120	2
16	80	6
17	40	4
18	0	3

Tab 5.8.- Tabela de dados processados para o ensaio de retilineidade da mecânica X.

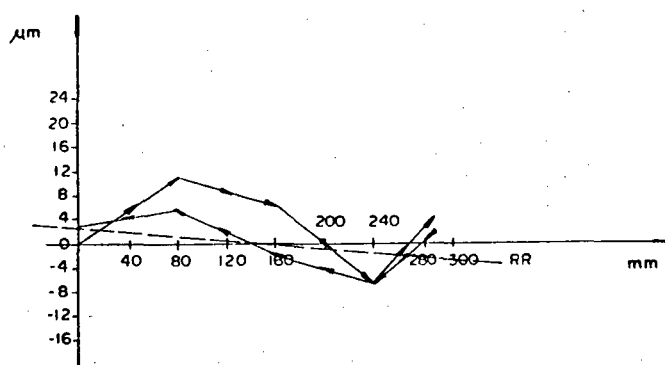


Fig. 5.6.- Gráfico dos erros de retilineidade da mecânica X.

O ensaio de retilineidade da mecânica Y, composto de 28 pontos verificados em 4 ciclos, com o posicionador Z no ponto $12,70\text{ mm}$, apresentou um erro de retilineidade máximo de $20\text{ }\mu\text{m}$, com erro de retilineidade positiva de $10\text{ }\mu\text{m}$ e um erro de retilineidade negativa de $10\text{ }\mu\text{m}$. Já o erro de alinhamento que pode ser verificado no gráfico dos erros de afastamento foi de $44\text{ }\mu\text{m/m}$.

Nº	Posição [mm]	Afastamento [mm]
1	0	0
2	40	9
3	80	4
4	120	7
5	160	7
6	200	10
7	240	12
8	280	16
9	320	20
10	360	23
11	400	28
12	440	34
13	480	42
14	500	44
15	500	46
16	480	44
17	440	35
18	400	30
19	360	16
20	320	15
21	280	13
22	240	10
23	200	9
24	160	5
25	120	4
26	80	3
27	40	2
28	0	-2

Tab. 5.9.- Tabela de dados processados.
Ensaio de retilidade da mecânica Y.

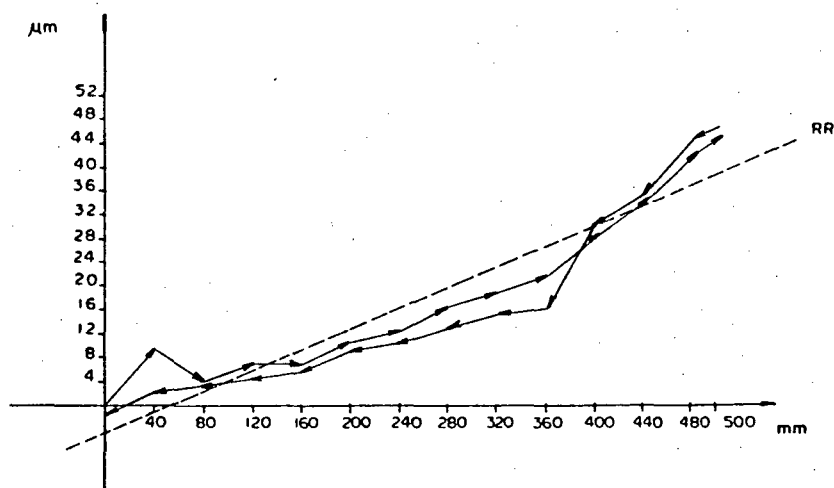


Fig. 5.7.- Gráfico dos erros de retilidade da mecânica Y.

Por último, o ensaio de retilidade da mecânica Z, (Tab. 5.10), composto de 16 pontos verificados em 4 ciclos com a mecânica Y no ponto 240mm, apresentou um erro de retilidade máximo de 11 μm , com um erro de retilidade positiva $Er+$ igual a 5 μm e um erro de retilidade negativa $Er-$ igual a 6,5 μm . O erro de alinhamento verificado neste ensaio foi de 220 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Nº	Posição [mm]	Afastamento [µm]
1	0,000	0
2	3,175	3
3	6,350	2
4	9,525	1
5	12,700	-2
6	15,875	-3
7	19,050	-4
8	22,225	1
9	22,225	2
10	19,050	-5
11	15,875	-2
12	12,700	-2
13	9,525	-1
14	6,350	1
15	3,175	2
16	0,000	3

Tab. 5.10.- Tabela de dados processados.
Ensaio de retilineidade da mecânica Z.

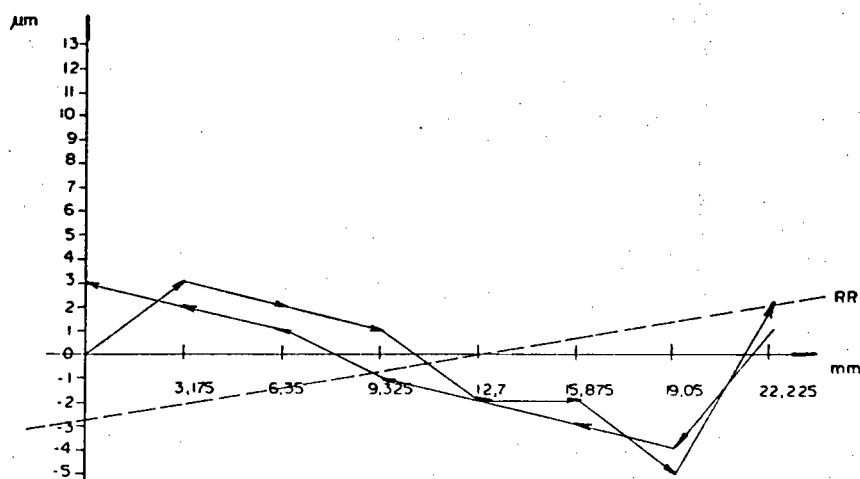


Fig. 5.8.- Gráfico dos erros de retilineidade da mecânica Z.
Conclui-se então que:

-Os erros de alinhamento ocorreram primeiramente pela montagem dos sistemas de guias de rolamento em sua base.

-A própria montagem da máquina operatriz sobre a máquina de medir coordenadas induz ao aparecimento destes erros.

-Os valores dos erros de retilineidade das mecânicas estão dentro dos especificados, comprovando o acerto na escolha da concepção mecânica da mesa.

A partir destes ensaios, pode-se analisar o erro de ortogonalidade dos três eixos, verificando-os aos pares. /9/. Observa-se que estes erros não serão muito variáveis e estarão intimamente ligados ao tipo de ajuste entre mecânicas, e entre rolamentos e guias que se fizer.

Utilizou-se de um sistema computacional chamado Micropak 21 para a retirada dos dados brutos. O processamento e os gráficos dos erros foram feitos manualmente.

5.3.- Ensaio Dinâmico do sistema

Para uma análise mais precisa do comportamento, em regime de trabalho, das mecânicas da furadeira e do conjunto, foram efetuados alguns testes experimentais.

A qualidade desta análise dependeu do tipo de exatidão daqueles, que foram efetuados em sua maioria, em uma bancada de ensaios de motor, também descrita neste capítulo.

5.3.1 - Desenvolvimento da Bancada para Testes de Motores de Passo

Tendo em vista que os motores de passo possuem curvas de torque x velocidade dependentes do acionamento eletrônico, e que para o desenvolvimento da furadeira houve a necessidade de testes para levantamento de rampas de aceleração e testes dinâmicos para medida do tempo de amortecimento dos motores com cargas, foi desenvolvida uma bancada para testes dos motores de passo. Este desenvolvimento acabou se revelando bastante vantajoso, tendo em vista que o tempo dedicado aos testes com a máquina montada foi bastante escasso devido a demora na entrega dos fusos de esferas recirculantes das mecânicas X e Y.

A bancada desenvolvida (fig. 5.9) é composta de uma base retificada em aço 1020 com quatro suportes (um em cada um dos extremos) que servem, além de apoio, como amortecedores do conjunto, já que os mesmos são feitos de borracha.

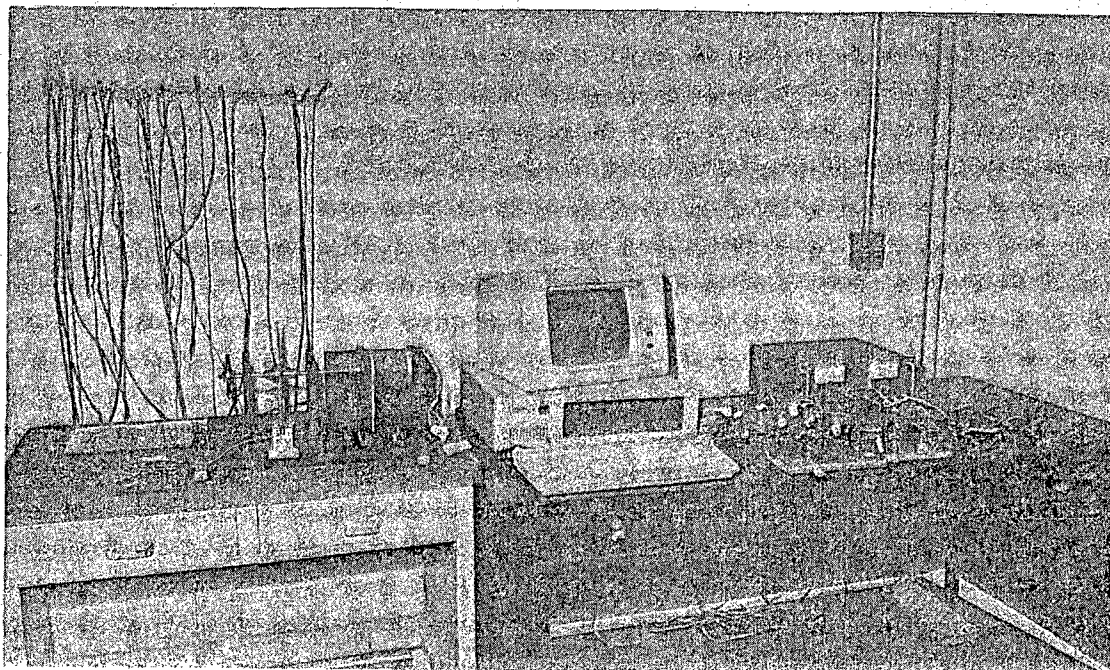


Fig. 5.9 - Bancada de testes para motores de passo.

Sobre esta base, foram montados dois mancais de rolamento com dois rolamentos de contacto angular. Em cada um destes rolamentos foi colocado um eixo usinado e retificado fabricado em aço doce. Estes eixos são passantes para os dois lados dos rolamentos.

Entre os dois mancais, os eixos foram unidos através de um acoplamento e junto à parte externa do eixo de um dos mancais, foi feita uma rosca que é utilizada para colocação de discos com pesos variados para os testes.

Já do outro lado, sobre a base, foi colocado um suporte flangeado que permite a montagem dos motores de passo.

A furação de montagem procurou manter a mesma altura dos dois mancais para que houvesse coincidência entre os eixos e não ocorressem esforços que mascarariam os ensaios.

Para união entre os eixos do motor e do mancal, foi utilizado um acoplamento de compensação semelhante àquele presente na máquina.

Como para muitos dos testes há necessidade de verificação da contagem do número de passos do motor e do sentido de rotação do mesmo, foi desenvolvido um sensor de posição do tipo encoder incremental que é composto de um disco de acetato com 200 divisões com alternância entre claro e escuro.

Para verificar o número de passos e o sentido do motor, foram usados dois sensores ópticos defasados de 90° elétricos, ou seja, um dos sensores foi colocado exatamente sobre uma das divisões e o outro, colocado entre duas divisões, permitindo que se faça contagem dos passos e identificação do sentido de rotação de maneira precisa.

Foi desenvolvido um circuito eletrônico, a partir da detecção de feixes infravermelhos emitidos por sensores optoeletrônicos que passam através do disco óptico, realizando a contagem do número de passos e a decodificação que são feitas utilizando-se circuitos integrados SN74C192N, que são medidores de nível alto e baixo, e de circuitos CD4011, respectivamente. Um visor de 5 dígitos indica então o número de passos e o sentido, positivo (horário) ou negativo (anti-horário), da rotação.

A contagem e indicação era feita diretamente no microcomputador que gerencia o sistema, mas isto acabou se revelando pouco eficaz, visto que o computador "gastava" muito de sua capacidade em uma operação bastante simples, sendo então desenvolvido um circuito em separado.

Os primeiros testes feitos com a utilização da bancada foram para levantamento das características de velocidade e operação dos motores, quando da utilização dos mais diversos tipos de rampa de aceleração e desaceleração.

5.3.2.- Determinação das rampas de Aceleração e Desaceleração para os Motores Utilizados

Tendo-se em vista o desenvolvimento da bancada para testes de motores de passo, foram efetuados vários testes nos mesmos para procurar a melhoria do seu desempenho.

Os motores de passo são bastante limitados, quando comparados com servomotores CA ou CC, por serem os controladores incapazes de atingir altas velocidades em tempo aceitável. Foram testados alguns métodos de controle de aceleração e desaceleração, tais como rampas lineares, exponenciais, exponenciais inversas e parabólicas.

A carga utilizada para o ensaio foi calculada através da igualdade entre as fórmulas da inércia, da movimentação linear de uma carga através de um fuso e da inércia de um disco.

Sendo:

$$I_{\text{fuso}} = r_f \cdot m \cdot p \quad \text{onde: } I_{\text{fuso}} = \text{inércia do fuso} \quad (5.1)$$

$r_f = \text{raio do fuso} = 7\text{mm}$
 $m = \text{massa total transportada} = 11\text{kg}$
 $p = \text{passo do fuso} = 4\text{mm}$

$$I_{\text{disco}} = 1/2 \cdot m_d \cdot r_d^2 \quad \text{onde: } I_{\text{disco}} = \text{inércia do disco} \quad (5.2)$$

$m_d = \text{massa do disco}$
 $r_d = \text{raio do disco}$

Igualando as duas fórmulas, teremos:

$$r_f \cdot m \cdot p = 1/2 \cdot m_d \cdot r_d^2$$

$$3,08 \times 10^{-4} = 1/2 \cdot m_d \cdot r_d^2$$

para um $r_d = 50,8\text{mm}$, temos:

$$m_d = 0,238 \text{ kg.}$$

A massa do disco é igual a:

$$m_d = p \cdot 3,1415 \cdot R_d^2 \cdot L \quad \text{onde: } p = \text{peso específico do material do disco} = 7,85 \times 10^{-3} \text{ para o aço}$$

$R_d = \text{raio do disco} = 0,0508\text{m} \quad (5.3)$
 $L = \text{largura do disco}$

Partindo-se de um diâmetro de $0,1016\text{m}$, tem-se:

$$md = 7,85 \times 10^3 \cdot \pi \cdot (0,0508)^2 \cdot L = 63,64 \cdot L$$

Substituindo, temos:

$$md = 0,238 = 63,64 \cdot L$$

$$L = 3,74 \text{ mm}$$

Foi então utilizado um disco de aço com diâmetro de 101,6 mm e espessura da chapa de 4 mm. Com esta carga aplicada à bancada de testes de motores, foram testadas as mais diversas rampas de aceleração e desaceleração, com o objetivo de alcançar maior velocidade nos motores aplicados à mesa. O método de testes das rampas foi empírico, ou seja, testam-se várias rampas com as mais diversas formulações matemáticas.

A primeira rampa testada foi a rampa linear. Para se gerar esta rampa de aceleração, um oscilador linear controlado supre um trem de pulsos de saída cuja frequência é proporcional à tensão de entrada.

Os tempos de rampa de aceleração e desaceleração são independentes e ajustáveis.

Conseguiu-se, com esse tipo de rampa, com a carga especificada e os motores das mecânicas X e Y uma frequência de passo final máxima de 1700 PPS. A partir deste valor, havia perda de passo detectada pelo contador. A tensão da fonte utilizada foi de 20V.

Para todas as rampas, a frequência do primeiro passo foi determinada, também, de forma empírica. A carga em forma de disco equivalente ao peso da mesa foi conectada ao eixo da bancada de testes e foram testadas várias frequências de maneira crescente, até que se atingiu uma velocidade em que os passos não eram perdidos, nem na aceleração, nem na desaceleração. Esta frequência determinada foi de 300 PPS.

A partir dos resultados de utilização desta primeira rampa, foram feitos alguns testes com a utilização da rampa exponencial na aceleração e a rampa exponencial inversa na desaceleração.

Utiliza-se a fórmula para geração da rampa exponencial de aceleração que era:

$$Vel = 300 + V_0(1 - e^{(-B/0,07)}), \quad (5.4)$$

onde B é igual ao tempo em segundos, que é $B = \text{tempo} / 1250000$. Para rampa de desaceleração, utilizou-se a exponencial inversa, que tem a fórmula igual a:

$$Vel = 300 + V_0(e^{(-B/0,07)}), \quad (5.5)$$

Muitos testes foram efetuados variando-se os valores pelos quais o tempo em segundos B é dividido.

Como esta forma é semelhante à do carregamento de um capacitor, o tempo de estabilização de curva é bastante elevado. Como os cálculos estavam sendo feitos automaticamente pelo computador, o número de passos gerado para atingir uma frequência final de 2000 PPS chegava a 100, sendo que a maioria destes, próximos do ponto de estabilização da curva. Para reduzir o número de passos utilizou-se o artifício de calcular rampas com a mesma fórmula para frequências maiores em cerca de 200 PPS, do que aquela frequência final pretendida. Com este artifício e utilizando-se uma fonte semelhante à anterior, alcançou-se uma velocidade de 2350 PPS sem perda de passo.

Através destes testes, percebeu-se que a rampa desejada deveria seguir um perfil semelhante ao de uma parábola.

A partir das equações para o perfil de velocidade, determina-se uma fórmula para o cálculo da velocidade de uma rampa parabólica igual a:

$$V = \left(\frac{V_o - V_m}{T^2} \right) \cdot t^2 + \left(\frac{2(V_m - V_o)}{T} \right) \cdot t + V_o \quad (5.6)$$

Sendo: V = a velocidade atual;
 V_o = a velocidade inicial;
 T = o tempo total;
 t = o tempo no instante;
 V_m = a velocidade final.

E a aceleração será:

$$a_I = a_{I-1} - A_a, \text{ onde:} \quad (5.7)$$

$$a_I = 2(V_m - V_o)/T \quad e$$

$$A_a = 2(V_o - V_m)/T^2$$

Utilizou-se um número de passos para geração da parábola e fez-se o cálculo das rampas diretamente no computador através dos dados de aceleração. Os dados carregam o TIMER que enviará as interrupções ao computador/62/.

Com a utilização da rampa (fig. 5.10), conseguiu-se um aumento significativo no torque verificado quando do levantamento das curvas de torque e velocidade dos motores utilizados.

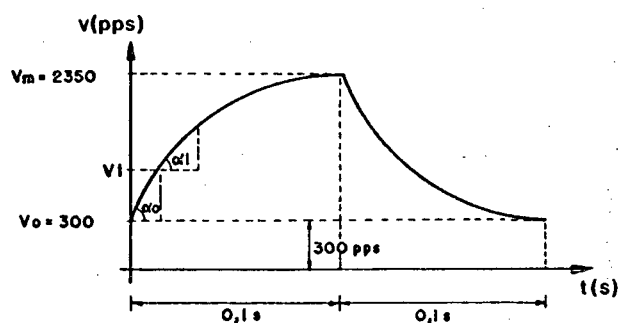


Fig. 5.10.- Rampa utilizada para aumento do torque.

5.3.3.- Levantamento das curvas de Torque x Velocidade dos Motores utilizados

Para verificação do acerto da utilização do tipo de acionamento eletrônico para os motores foi efetuado o levantamento das curvas de torque/velocidade dos motores da furadeira. Como as cargas aplicadas, "o drive" e os motores são semelhantes nas mecânicas X e Y, foram feitos testes com um destes motores. Para o motor que produz o movimento de avanço da mecânica Z, foi feito também o levantamento da sua curva de velocidade x torque, já que o fabricante do motor e a concepção do drive são outras, além de que as potências dos motores são diferentes.

A curva de torque de dessincronização x velocidade representa o máximo torque de carga total que o motor pode produzir em função das velocidades. Para velocidades acima da faixa de torque de sincronização ou taxa de resposta, o motor é primeiro acelerado acima da velocidade e então as cargas vão sendo aumentadas.

O ensaio foi efetuado utilizando-se a bancada para testes de motor de passo que já foi descrita anteriormente. São acoplados discos ao eixo da bancada, que é ligado ao motor e ao contador de passos. Os acoplamentos entre o motor e o eixo, por sua vez, são semelhantes aos utilizados na furadeira, ou seja, para os motores das mecânicas X e Y foram usados acoplamentos do tipo OLDHAM e para a mecânica Z, uma conexão flangeada. Não foram usadas engrenagens para que a curva de torque do motor não tivesse seu resultado alterado por possíveis folgas neste acoplamento.

Os discos que são acoplados possuem pesos variados e vão sendo colocados solidários ao eixo principal. Com isso, aumenta-se a inércia do sistema de giro, que segue o princípio da fórmula:

$$I = 1/2 \cdot m \cdot r^2$$

(5.8)

onde m é massa do conjunto e r , o raio.

Todos os discos possuem o mesmo diâmetro.

A perda de passo é indicada através de um mostrador que fornecerá o sentido de rotação do movimento.

Já o torque desenvolvido pelo motor será igual a:

$$T_t = I \cdot \ddot{\alpha}(t)$$

(5.9)

onde T é o torque do motor, I , a inércia do sistema de giro e $\ddot{\alpha}$, a aceleração angular ou desaceleração a qualquer instante.

Os resultados das curvas de torque de dessincronização e das respectivas velocidades estão colocados a seguir:

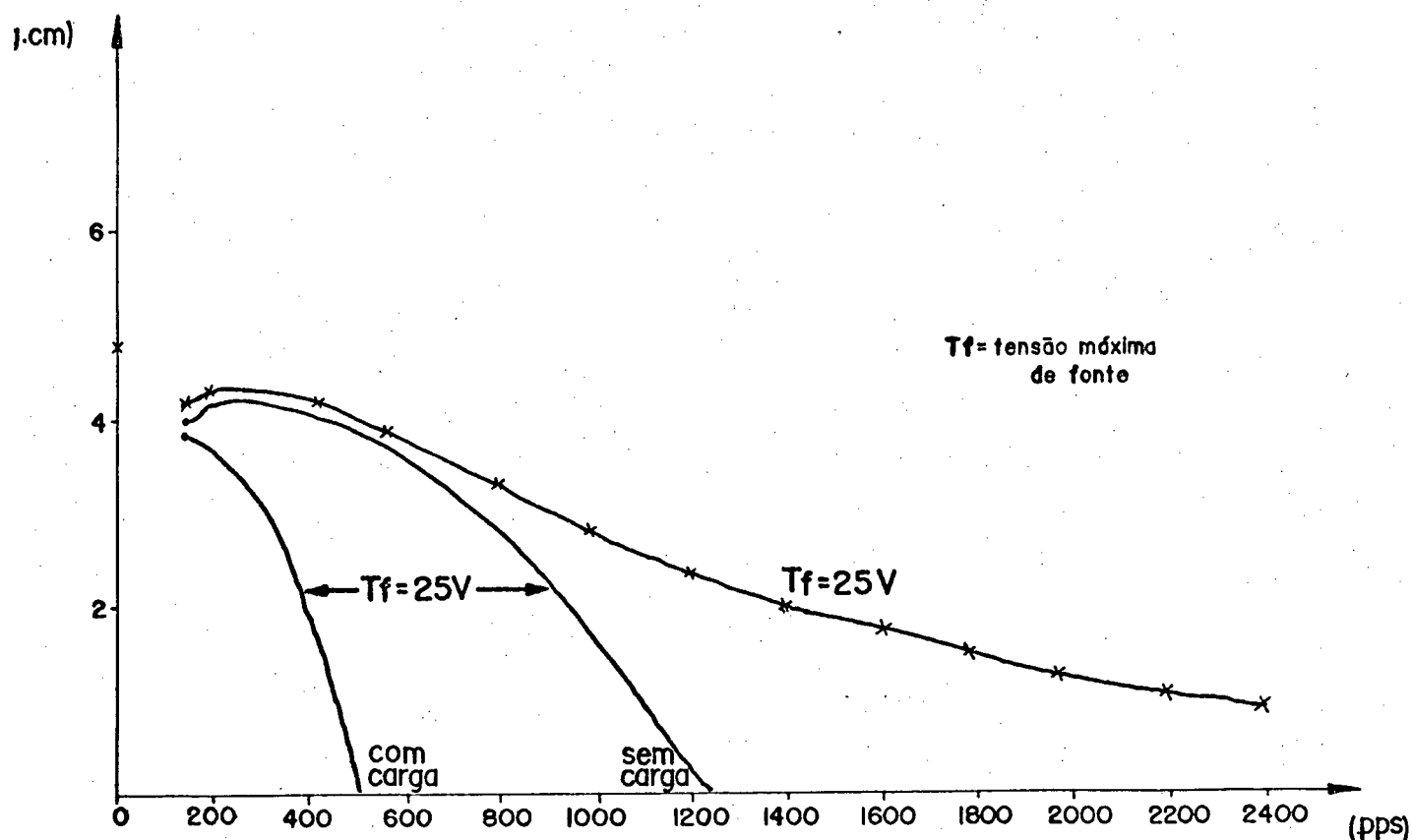


Fig.5.11- Característica de torque/velocidade motor 0,48 N.m

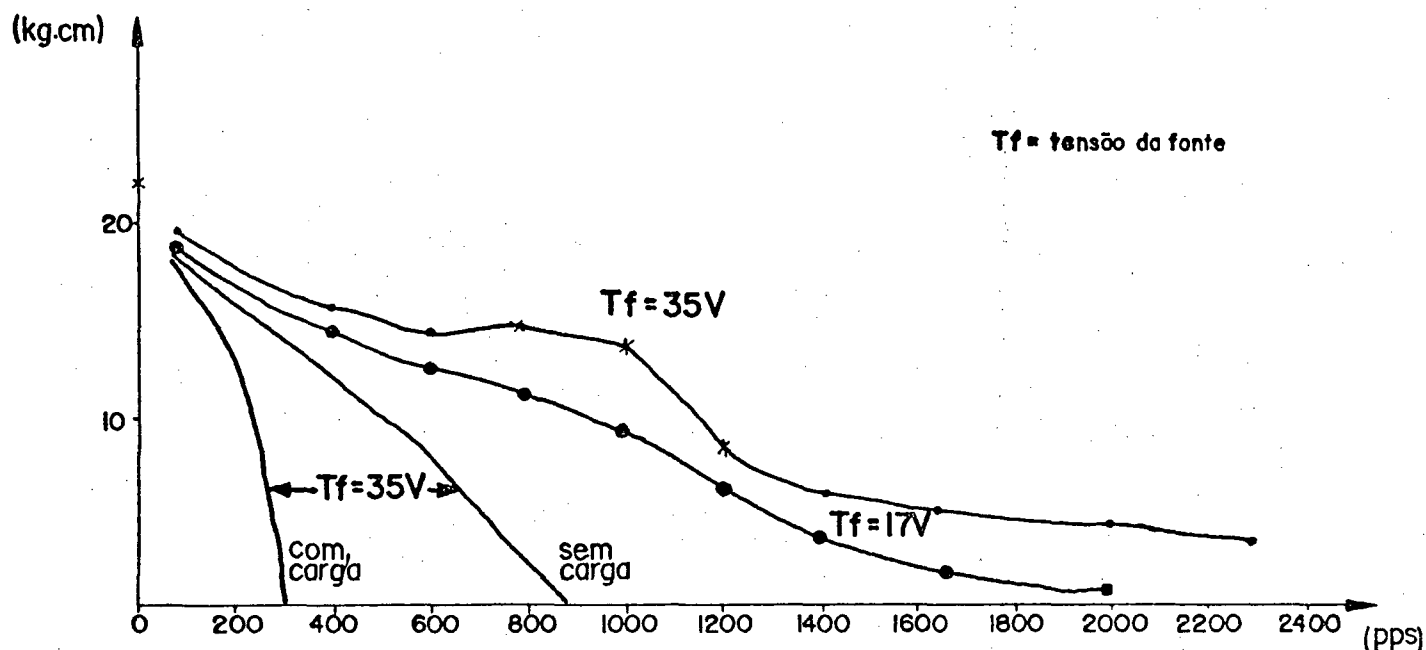


Fig.5.12- Característica de torque/velocidade motor 2,2 N.m

Verificou-se que existem faixas de velocidade onde o motor apresenta ressonância e por este motivo, existe queda bastante acentuada do torque nestas. As curvas mostradas vem a ser médias de torque Pull-out. Com os resultados deste torque, subtraído do valor do torque de fricção aplicado à furadeira nos diferentes casos, obtém-se o torque disponível para aceleração do motor e com isso se determina o tempo ótimo para aceleração, ou seja, o tempo para a rampa.

Esse tempo foi estimado para o dimensionamento dos motores, mas pode ser otimizado tendo-se agora o comportamento dos motores acoplados ao acionamento eletrônico utilizado.

Já para a curva de torque Pull-in, a carga de inércia tem um grande efeito de modificação da mesma. As curvas foram obtidas utilizando-se cargas friccionais acopladas, verificando-se a resposta da velocidade.

Para as curvas dos motores X e Y, variou-se a tensão de alimentação dos amplificadores de potência, já que a primeira tensão utilizada foi de 17 volts, considerada baixa pelos resultados apresentados. O nível de tensão utilizado posteriormente foi de 35 volts, conseguido através da aplicação de um variador de tensão CA (Varivolt) na entrada da fonte.

5.3.4.- Análise do comportamento funcional das mecânicas da mesa. Ensaio experimental.

Analisa-se neste a parte transitória da curva de resposta no tempo. Esta, por sua vez, serve para a análise do desempenho do sistema e correções neste.

Foram obtidas as curvas de resposta no tempo experimentalmente utilizando um sistema de medição. Este, por sua vez, não pode ser acoplado à furadeira, visto que a mesma não estava ainda totalmente concluída por ocasião da data dos ensaios. Estes foram então feitos utilizando-se a bancada para testes de motor de passo e o sistema ficou composto de um potenciômetro de precisão acoplado ao eixo da bancada um sistema de alimentação deste potenciômetro e um osciloscópio de memória com registrador xt. Os elementos utilizados pertencem ao Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR) e possuem as seguintes características:

- Potenciômetro de precisão multivoltas

- Osciloscópio de memória

Fabricante	: Tektronix
Modelo	: 2230 Storage Oscilloscope
Frequência	: 100 MHz
Memória	: 8 bits

- Registrador

Fabricante	: HP-XY 7015B
Precisão	: $\pm 0,3\%$ escala máxima
Área útil	: 180x250 cm

Na figura 5.13, mostra-se o esquema de montagem do esquema de medição.

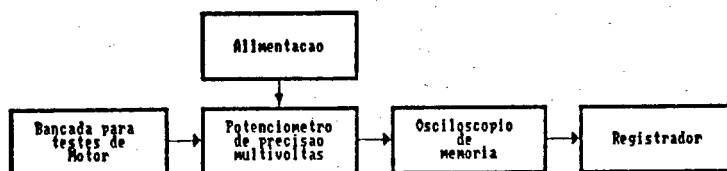


Fig. 5.13.- Sistema de medição.

O osciloscópio é ligado no terminal negativo da alimentação e no terminal central do potenciômetro. Consegue-se, com isso, medir as respostas no tempo.

Utilizou-se como sinal de entrada 1 passo e foram feitos ensaios somente com os motores e com os motores conectados às mesas carregadas (no caso da mecânica X com placas). Foi feito também o teste com 20 passos de sinal de entrada para a verificação do comportamento quando o motor é acelerado.

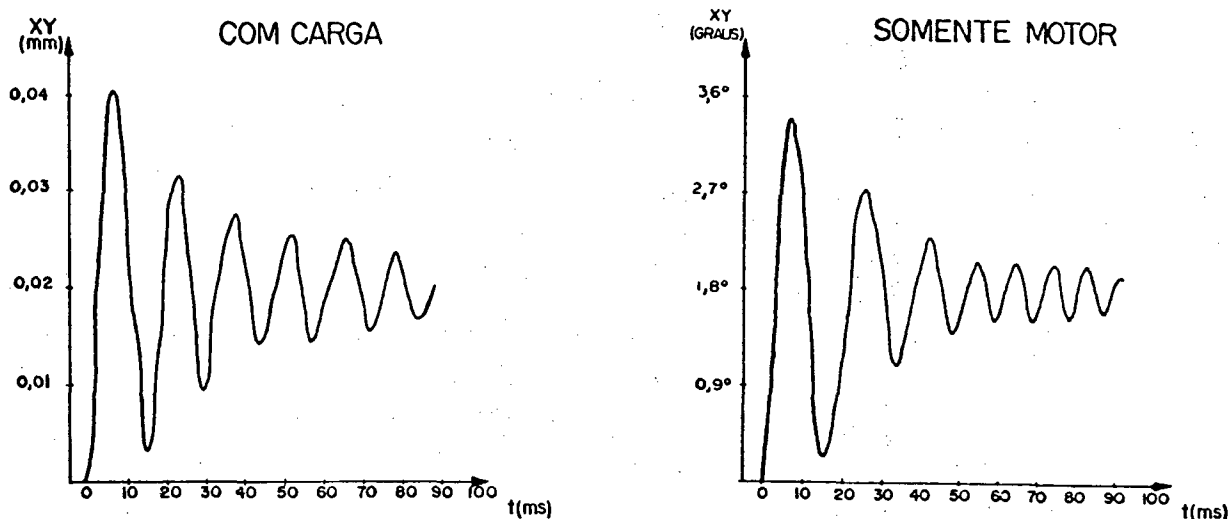


Fig. 5.14- Amortecimento do motor de 2,2 N.m em relação ao tempo

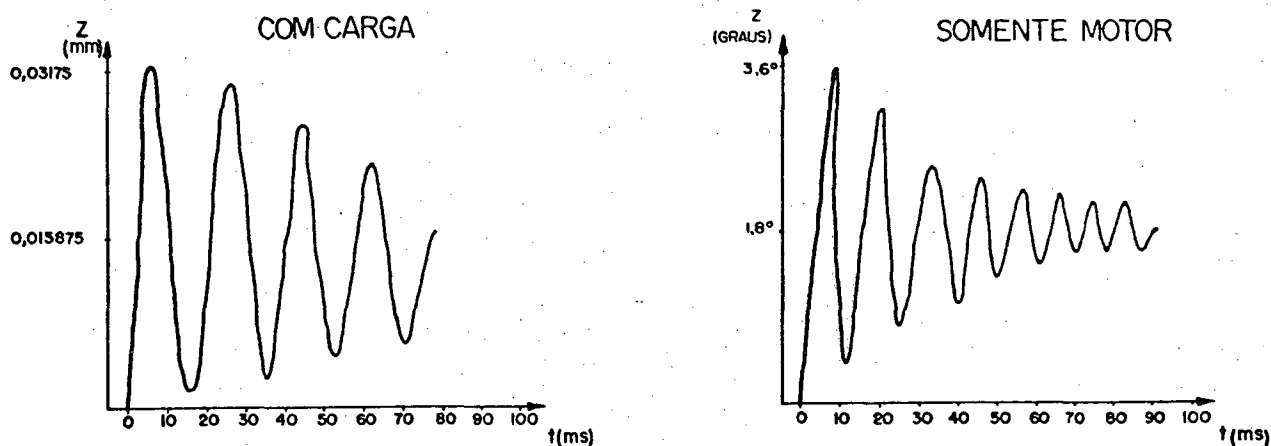


Fig. 5.15- Amortecimento do motor de 0,48 N.m em relação ao tempo

Os resultados encontrados devem diferir um pouco dos reais, já que com sistema mecânico empregado na mesa deverá haver um maior amortecimento.

5.3.5.- Ensaio da excentricidade estática e posicionamento da broca sobre a posição de furação da mecânica Z.

Um dos pontos mais importantes para furação de placas de circuito impresso com precisão é a análise do cabeçote quanto à excentricidade do motor e a sua influência sobre a mecânica Z, na descida desta sobre a placa.

Para medida da excentricidade foi utilizado o apalpador de uma máquina de medir coordenadas, onde foram fixados dois dos seus eixos. No local da broca, foi colocado um cilindro de aço ferramenta com 20 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro.

O cabeçote é então, acionado à velocidade de 2000rpm e a excentricidade, verificada na ponta do cilindro, é medida. Nesta verificou-se que a mesma ficou em torno de 0,003mm. Esta medição deverá ser feita regularmente, já que para a furação de precisão, a excentricidade não deverá ultrapassar 0,005mm. Quando este valor for atingido, deverá ser providenciado um ajuste ou desmontagem para reparo do cabeçote. Veja fig. 5.16.

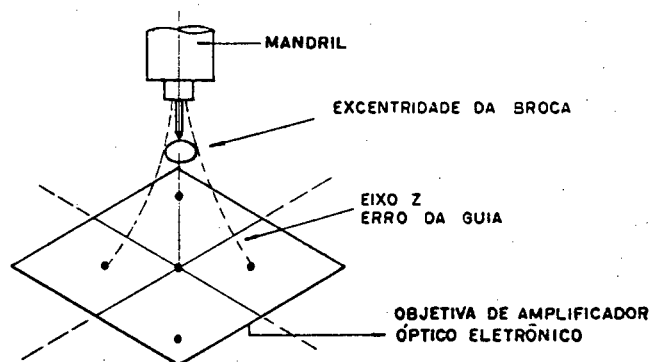


Fig. 5.16.- Medida da excentricidade da mecânica Z.

Quanto à excêntrica da mecânica Z quando operando à alta velocidade, foram feitas medições fixando-se sobre a base da mesa um registrador do deslocamento do cabeçote, que serviu para medir o ponto em que ocorre o toque da broca na descida em relação à um ponto teórico.

O registrador é composto de uma câmara com ampliação usada para centragem do fuso, e sobre a lente desta, foi colocado um acetato de 2mm de espessura. A lente da câmara possui uma "mira" e, sobre esta, a broca é centrada, estando o motor do cabeçote desligado.

Faz-se a regulagem do curso do cabeçote para que a ponta da broca toque o acetato preso sobre a lente da câmara. O motor do

cabeçote foi então acionado à velocidade de 60.000rpm e foram feitos testes, utilizando-se o tipo de material da broca utilizada.

O processo não é muito preciso, mas pode-se observar que para o aço rápido como material de uma broca de diâmetro 1 mm ocorre um deslocamento bastante acentuado em relação ao ponto desejado, que chega a ser de até 0,003mm. Para brocas recobertas com carboneto, este valor será de cerca de 1/3 do valor anterior variando segundo o tipo de recobrimento utilizado. Com isso, conclui-se que as brocas de aço rápido não deverão ser utilizadas na máquina, principalmente quando se estiver fazendo furação de precisão. Outro dado importante que se deve observar é a ortogonalidade da mecânica Z em relação à base da mecânica X. Qualquer desalinhamento poderá levar à quebra das brocas. Por isto, a checagem e o ajuste regular deste item deverão ser feitos periodicamente como procedimento normal de manutenção preventiva.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1.- Conclusões

Com o término do desenvolvimento e montagem dos testes da furadeira com comando numérico para placas de circuito impresso, pode-se fazer a análise do trabalho.

Para que a máquina desenvolvida tivesse uma alta precisão de funcionamento, e ao mesmo tempo, um baixo custo de desenvolvimento, foram necessárias algumas ações.

- Construção da maioria das peças móveis da furadeira em alumínio, para redução das massas a serem transportadas pelos motores.

- Emprego de motores de passo operando em malha aberta reduzindo o custo do sistema e simplificando o acionamento.

- Concepção da máquina separando as mecânicas X e Y, fazendo com que as mesmas tenham movimentos independentes, o que permitiu a utilização de motores de mesma potência nas duas mecânicas, já que as massas transportadas são quase iguais, além de ter reduzido o tamanho necessário para as mecânicas, guias e fusos e, portanto, o tamanho da máquina.

- Utilização de elementos mecânicos que possuam, sempre que possível, similares nacionais.

- Através da utilização de fusos de esferas recirculantes, de classe C5, como elemento de transmissão mecânica, obteve-se uma alta precisão, com boa rigidez e baixa inércia, que não seriam alcançados com nenhum outro método de transmissão, a não ser que se utilizasse realimentação através de sensoramento de posição.

- Dimensionamento dos motores das mecânicas X e Y de maneira que seja permitida a utilização de mais de um cabeçote, além de possíveis aumentos na velocidade de posicionamento das mecânicas ou esforços de corte.

- Dimensionamento do cabeçote de maneira que possa ser feita a fresagem das placas quando os comandos relativos a esta

operação estiverem implementados no software.

De acordo com os ensaios realizados, pode-se concluir que:

-Os erros de posicionamento dos eixos se situam dentro dos erros admissíveis para furadeiras de placas de circuito impresso com comando numérico [Cap.5].

-Os erros de retilidade e ortogonalidade dependem do ajuste a ser obtido na montagem das peças da máquina, já que a precisão alcançada na usinagem das peças foi bastante elevada.

-Pode-se observar que a falta de fixação adequada dos parafusos das peças sobre o granito leva a um desalinhamento indesejável que pode se refletir em imprecisões ao longo do tempo de funcionamento.

-A precisão da furação depende dos ajustes obtidos no cabeçote, que devem ser executados a cada ciclo de utilização da máquina.

-Foram furados cerca de 10 "sandwiches" de placas de circuito impresso e o comportamento apresentado pela máquina quanto à velocidade e precisão de posicionamento está dentro dos valores especificados quando do projeto da mesma.

-O sistema necessita de melhor amortecimento para reduzir a amplitude de vibração, bastante danosa quando se esta usinando furos de precisão, apesar de não ter sido verificado nenhum problema de acabamento nos furos executados com a velocidade de posicionamento alcançada (cerca de 45 mm/s).

Segundo os circuitos eletrônicos desenvolvidos, pode-se afirmar que:

-A resolução obtida permite a utilização do posicionador para outras aplicações, tais como montagem e controle de qualidade, fresagem etc.

-A utilização de sensores ópticos para proteção e indicação de posição e as chaves de fim de curso para travamento dos motores mostraram ser sistemas bastante confiáveis e eficientes que evitam danificação dos eixos nas operações além do limite permitido.

-A utilização de um microprocessador de 16 bits tornou o comando dos motores bastante eficiente, mesmo utilizando as rampas de aceleração e desaceleração.

-Os resultados obtidos com o amplificador de potência, acionado por dois níveis de tensão, mostraram ser este tipo de acionamento muito eficaz, mesmo se comparado com amplificadores de potência tipo Chopper.

Já quanto ao software, concluiu-se que:

-A utilização de um microcomputador da linha IBM-PC permitiu um bom interfaceamento, entre Homem e máquina, através do teclado, além dos cálculos das rampas poderem ser executados diretamente, já que existe bastante capacidade computacional.

-O software, desenvolvido na primeira fase, procurou apenas implementar os comandos mais simples, permitindo o funcionamento básico da máquina (Apêndice II).

-Com a linguagem Turbo Pascal, versão 5.0, sendo utilizada para a geração do software, consegue-se enviar até 10.000 interrupções/segundo para a lógica de passo. Como este número está muito acima dos requeridos pelos motores de passo, não foi necessário o uso de linguagem a nível de máquina, como o assembler.

6.2.- Sugestões para trabalhos futuros.

Tendo em vista o projeto desenvolvido, fica evidente que nem todas as idéias puderam ser desenvolvidas, por isso, fazem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

-Desenvolvimento de um sistema de troca automática de ferramentas para o cabeçote que necessitará modificações estruturais na furadeira além de desenvolvimento de um sistema em Hardware para liberação/travamento da broca. Este sistema se faz necessário visto que são utilizados em média 5 diâmetros de brocas por tipo de placa (em máquinas sofisticadas o magazine de ferramentas permite a colocação de mais de 200 tipos de ferramentas para serem utilizadas na furação e fresagem de placas em geral).

-Implementação do software de controle com comandos ASCII, de troca automática, fresagem da placa, controle de velocidade do posicionamento e do cabeçote, para permitir a melhor utilização da capacidade da máquina.

-Redução de peças para facilitar a montagem e regulagem da máquina.

-Execução de sedes para todos os parafusos de fixação da estrutura sobre o granito.

-Desenvolvimento de um cabeçote óptico e de um software de controle para programação da máquina direto sobre o fotolito.

-Substituição do motor do cabeçote por uma câmera de digitalização de imagem, na mesma máquina, que permita o controle de qualidade das furações executadas sobre a placa.

-Desenvolvimento de um sistema de amortecimento baseado na comutação de fases (tipo "Bang-Bang"), que reduza as oscilações prejudiciais à usinagem de furos, principalmente de pequenos diâmetros.

-Substituição do cabeçote, acionado por micro-motor de corrente alternada e motor de passo, por uma turbina pneumática e execução de um estudo comparativo de qualidade dos furos obtidos.

-Tensão aumentada nos amplificadores de potência dos motores com reprojeto dos mesmos e utilização de transistores MOSFET para operar com frequência de chaveamento acima de 20 KHz.

-Desenvolvimento de um módulo para auxílio de programação manual e de um sistema de simulação que aceite como entrada um arquivo de programa CNC.

Finalmente, pode-se concluir que a Furadeira para Placas de Circuito Impresso com Comando Numérico desenvolvida, acionada por motores de passo em malha aberta e controlada por um micro-computador da linha IBM-PC, apresentou resultados dinâmicos e metrológicos compatíveis com as necessidades da Indústria Nacional. Além disso, seu custo de construção, (em torno de U\$ 10.000,00), não é elevado, se comparado às máquinas importadas, (em torno de U\$ 60.000,00), o que certamente tornará esta, uma alternativa bastante atrativa quando colocada no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ ALIQUE, J. R., "Control Numérico", Marcombo S.A., Barcelona, 1981.
- /2/ ALLOCA, John A. & STUART, Allen., "Transducers Theory and Applications", Prentice Hall Company, Virginia, 1984, p.215-25.
- /3/ ANTUNES, Ulisses & SANCHEZ, Fernando R., "Projeto e Fabricação de Circuito Impresso", Itau Componentes S.A., São Paulo, 1986.
- /4/ BAHNIUK, Douglas E., "Improved Optics and Increased Tolerance to Jitter Let Modular Encoders Cut the Costs of Motion Control Systems", Machine Design, Penton Publishing, 26 jan, 1989, p.46-49.
- /5/ BELTER, S., "Computer - aided routing of Printed Circuit Boards", Byte, Peterborough, jun, 1987, p.199-208.
- /6/ BERNARD, K., "Timing Belt-drives: Quiet Synchronization with no Power Loss", Machine Design, Penton Publishing, 23 jan, 1986.
- /7/ BETIOL, Wolney E. G., "Controle de Acionamento por Motores de Passo Aplicados a Impressoras Matriciais", Dissertação de Mestrado, CEFET-PR, 1989.
- /8/ BULLINGER, H.J. & SOLT, J.J. "Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung III. Stellteile an Werkzeug Maschinen. Fallstudien Bundesanstalt fuer Arbeitsschutz und Unfallforschung", Dortmund, 1979, p.22-25.
- /9/ CAMARGO, Luiz F. S., "Mesa de Coordenadas XY para Aplicação em Microengenharia com CNC", Dissertação de mestrado, UFSC, 1988.
- /10/ CARLISLE, Ben. H., "AC Drives move into DC Territory", Machine Design, Penton Publishing, 9 may, 1985, p. 61-64.
- /11/ CARLISLE, Ben H., "Stepping Motors: Edging into Servomotor Territory", Machine Design, Penton Publishing, nov, 1986, p.88-93.
- /12/ CATALOGO BERG, "Precision Mechanical Components", USA, 1989.
- /13/ CATALOGO INSEL, "Linear System", Deutschland, 1984.
- /14/ CATALOGO Lintech, "Products Catalog", USA, 1989.
- /15/ CATALOGO NSK, "Precision Machine Parts Linear Motion Products", Japan, 1988.

- /16/ CATALOGO OZO, "CNC Drilling and Routing Equipment", Canadá, 1986.
- /17/ CATALOGO ROLAMENTOS PAULISTA, "Catálogo Geral", São Paulo, 1988.
- /18/ CATALOGO Superior Electric Company, "Design Engineer's Guide DC Stepping Motors", USA, 1976.
- /19/ CATALOGO THOMPSON, "Linear Motion Technology Guide", USA, 1989.
- /20/ CHEUNG, Vincent K. H. & MO, John P. T., "Supervisory Control of Robot in an Application to Flexible Printed Circuit Board Drilling", 7^o CBA-ITA, São Paulo, 1989, p.687-92.
- /21/ COOMBS, Clyde F., "Printed Circuits Handbook", McGraw Hill, New York, 1978.
- /22/ CHIAVERINI, V., "Aços e Ferros Fundidos", Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1982.
- /23/ COUPLINGS, "Machine Design", 30 jun, 1983, p.58-62.
- /24/ CUNHA Jr., H. & GOELDEL, C., "Alimentação e Controle de um Motor de Passo em Malha Aberta", IV Congresso Brasileiro de Automática, Campinas, 1982.
- /25/ CUTRIGHT, David, "High Accuracy Enclosures Available to users though Automated Design", Electronic Manufacturing, Lake Publishing Corporation, Illinois, oct, 1989.
- /26/ FERRARI, Gary, "An Analysis of Personal Computer and Workstations for Printed Circuit CAE/CAD", Electronic Manufacturing, dez, 1988.
- /27/ FERRARESI, Dino "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Edgard Blücher, São Paulo, 1982.
- /28/ FERREIRA, A. C. & STEMMER, C. E., "Características e Programação de Máquinas-Ferramenta com Comando Numérico", Polígrafo do GRUCOM, UFSC, 1984.
- /29/ FREIRE, José, "Tecnologia Mecânica", Livros técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1976, 5V., p.202-09.
- /30/ GAYAKWAD, Romakant & SOKOLOFF, Leonard, "Analog and Digital Control Systems", Prentice-Hall, New Jersey, 1988.

- /31/ GIMENES, Nilton M. , "Precisão e Rigidez decretam o fim dos Barramentos", Máquinas e Metais, nov, 1988, p. 18-45.
- /32/ GOMES, Mario & BRESCIANI, Ettore , " Propriedade e usos de Metais não ferrosos", Associação Brasileira de Metais, 1988.
- /33/ GOULET, David, "Small Hole Drilling", Electronic Manufacturing, abril, 1988.
- /34/ GOULET, David, "Fusos Variações Tecnológicas", Circuito Impresso, nov, 1989.
- /35/ GROSS, H. , "Electrical Feed Drives for Machine Tools", SIEMENS A. G., John Wiley & Son Ltd., 1983.
- /36/ GROOVER ,M., ODREY,N.,WEISS,M.,NAGEL,R.," Robótica Tecnologia e Programação, McGraw-Hill, São Paulo, 1988, p.95-96.
- /37/ HAJDU, G. , " The Influence of the Characteristics of Machine Tool Guideways Concerning the Dynamic Behaviour of Machine Tool Slides", XIV International Machine Tool Design and Research Conference, 1984.
- /38/ HALL, Allen S. & HOLOWENKO, Alfred R. , "Elementos Orgânicos de Máquinas", Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1968.
- /39/ HANNA, Luis, "A Nacionalização do Fuso de Esferas", Máquinas e Metais, jul, 1986.
- /40/ HANNA, Luis, "Fuso de Esferas: Eles dão Confiabilidade às Máquinas", Máquinas e Metais, jul, 1986.
- /41/ HARNED, Timothy J. , "Making Stepper Motors Behave", Machine Design, Penton Publishig, 26 sep, 1985.
- /42/ HEIKKILA, Kurt E. , "Factors Affecting Through-Hole Plating of Printed Wiring Boards", Electronics, sep, 1984, p. 29-27.
- /43/ HORBER, Ralph, W. , " Higher Torque from Hibrid Stepper Motors", Machine Design, Penton Publishing, apr, 1985, p.23-29.
- /44/ HOUSMAN, Robert J. , "Drill bit Technology", Tulon Technical Report nº TR390, USA, 1983.
- /45/ HOUSMAN, Robert J. , "Solid Carbit PCB Drills", Tulon Technical Report nºTR392, USA, 1982.

- /46/ HOUSMAN, Robert J. & SCOTT, Henry, "Modern Coating Technology Shows Genuine Promise for PCB Drills", Tulon Technical Report, USA, 1982.
- /47/ INTEL, "Intel Microsystem Components Handbook: Microprocessors and Peripherals", Intel, 1985, V.1, p.750-803.
- /48/ KUO, Benjamin C. , "Step Motors and Control Systems", SRL Publishing Company, Illinois, 1979.
- /49/ KUO, Benjamin C., "Theory and Applications of Step Motors", West Publishing Co., Illinois, 1974, 2V.
- /50/ LICHTBLAU , Marcos, "Uma contribuição ao estudo da dinâmica de posicionadores", Dissertação de Mestrado, UFSC, 1989.
- /51/ LINDSEY, Darryl. , "The Design & Drafting of Printes Circuits", Bishop Graphics, Inc., California, 1979.
- /52/ MARTIN, Carlos A. , "Dinâmica de Sistemas de Comando e Servomecanismos", Polígrafo de Pós-graduação, UFSC, 1984.
- /53/ MOORHEAD, Jack, "Numerical Control Fundamentals", Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1980, p.21-23.
- /54/ MOSES, Morris , " Circuitos Impressos", Editora Glem s.a., Buenos Aires, 1967, p.11-27.
- /55/ MUTOLO, Frank V. , " Inner-race Tolerances are Critical to Linear Bearing Life", Machine Design, Penton Publishing, aug, 1987.
- /56/ NIEMANN, Gustav, "Elementos de Máquinas", Editora Edgard Blücher, Munique, aug, 1978, 2V.
- /57/ NOBBE, Thomas A. & SENECHKO, Myron, "Precision Mechanical Support for Electronic Systems", Machine Design, Penton Publishing, fev, 1984.
- /58/ NORTON , Harry N., "Handbook of Transducers for Electronics Measuring Systems", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969, p. 331-52.
- /59/ OEMMICHEN, J., " Tecnologia de los Circuitos Impressos",Paraninfo, Madrid, 1965.

- /60/ OLESEN, Ole, "Simpler Routes to Position Control", Machine Design, Penton Publishing, 9 mar, 1989, p. 143-47.
- /61/ OLIVEIRA, Nery, "Aacionamento de Avanço CA de Alta Precisão para Máquinas-ferramenta, Máquinas e Metais, maio, 1989.
- /62/ PALMIN, S. & SHLAIN, V., "Stepper Motor Controller with Parabolic Velocity Profile Allows Maximun Torque", Control Engineering, fev, 1986.
- /63/ PAULAT, Joseph, "A New Look of Microstepping", Machine Design, Penton Publishing, mar, 1989, p. 79-83.
- /64/ PETRUCCI, Eládio G. R., "Materiais de Construção", Editora Globo, Rio de Janeiro, 1976.
- /65/ POBLET, José M., "Electrónica y Automática Industriales", Editora Marcombo, Madrid, 1981.
- /66/ POLK, Thomas, "Elastic Belt Drives", Machine Design, Penton Publishing, oct, 1984, p.95-99.
- /67/ RICKERT, Robert L., "AC Servos Increase Machines Tool Productivity", Machine Design, Penton Publishing, Machine Design, fev, 1985, p. 135-39.
- /68/ SILMAN, H., "Chemische und Galvanische Überzüge", Verlag Chemie, Meinheim, Deutschland, 1960, p. 443-59.
- /69/ SKF "Positioning tables offer drives in three styles", Engineering Materials and Design, sept, 1985, p.26-27.
- /70/ TAUB, Herbert, "Circuitos digitais e Microprocessadores", McGraw Hill, São Paulo, 1984, p.265-75.
- /71/ USASTEGUI, José A. & GONZALES, Rafael A., "Curso de Robótica", Ed. Paraninfo S.A., Madrid, 1985, p.207-28.
- /72/ WIJFFELS, T., "Os Motores de Passo", Revista Elektor-Eletrônica, Publitrón Publicações Técnicas Ltda, nov, 1986.
- /73/ WILE, Don, "Requeriments for PCB Small-hole Drilling Machines", Electronic Manufacturing, Lake Publishing Corporation, Illinois, apr, 1989.

APÊNDICE I

CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE PASSO UTILIZADOS.

-Motores das mecânicas X e Y da furadeira:

Fabricante: Astrosyn Co. Ltd, Japan.
Modelo: 34PM-C103
Tipo: Híbrido
Ângulo de passo: 1,8 graus
Inércia do rotor: 1100 g.cm²
Torque estático: 22kg.cm
Peso: 2100 gramas
Tensão nominal: 3V.
Corrente por fase: 4A
Número de fases: 4
Torque residual: 700 g.cm
Indutância de fase: 3,5 mH
Resistência de fase: 0,75 ohms.

-Motor da mecânica Z da furadeira:

Fabricante: Syncro.
Modelo: 840-001-4
Tipo: Híbrido
Ângulo de passo: 1,8 graus
Inércia do rotor: 117 g.cm²
Torque estático: 48 N.cm
Peso: 500 gramas
Tensão nominal: 5V.
Corrente por fase: 1A
Número de fases: 4
Torque residual: 4 N.cm
Indutância de fase: 15 mH
Resistência de fase: 5 ohms.

APÊNDICE II

DEFINIÇÃO DOS CÓDIGOS DE COMANDO

COMANDOS GERAIS (IMPLEMENTADOS)

G01 - Modo Linear

Ativa o modo de interpolação linear. A mesa movimenta-se para as coordenadas sucessivas ao longo de uma linha reta com velocidade controlada.

G90 - Modo Absoluto

Ativa o modo de medida absoluta, onde todas as coordenadas são referenciadas em relação ao zero de trabalho.

G91 - Modo Incremental

Estabelece o modo incremental, no qual cada coordenada é referenciada a partir da última. Não afeta o zero de trabalho porque o computador simula um sistema incremental pelo acúmulo das coordenadas de entrada em dimensões absolutas. O acumulador incremental é limpo ao final de um padrão de passo e repete, no fim do programa ou pelo RESET do sistema.

M00(X#Y#) - Fim de Programa - Não Rebobina

Indica fim de programa sem rebobinar. Se uma coordenada está contida no mesmo bloco, a mesa irá se mover para a posição relativa ao zero corrente da máquina. Se não há coordenada contida no bloco, a mesa pode se mover para uma posição de parada pré-ajustável.

M06(X#Y#) - Parada Opcional

Este comando é similar ao comando para parada de inspeção, a única diferença é que ela deve ser implementada pelo operador da máquina.

M30(XHYH) - Fim do Programa com Rebobinamento

Indica o fim de um programa e rebobinamento da fita. Se uma coordenada está contida no mesmo bloco, a mesa irá mover-se para a posição relativa ao zero de máquina corrente. Se o bloco não contém uma coordenada, a mesa irá se mover para uma posição de parada pré-ajustada.

M47,TEXT - Mensagem ao Operador

O texto do bloco do comando M47 é apresentado no vídeo pela máquina. Este comando pode ser usado para identificar uma parte do programa antes da sua execução. Nota: O tamanho do texto pode ser limitado de acordo com a implementação do fabricante e limitações do ASCII ou EIA.

M71 - Modo de Medição Métrico

Estabelece o modo de medição métrico. Ambos os comandos de modo métrico ou polegadas são voltados somente para inicialização e não podem ser usados uma vez que o programa tenha sido iniciado.

M72 - Modo de Medição em Polegadas

Estabelece o modo de medição em polegadas.

COMANDOS GERAIS (NÃO IMPLEMENTADOS)**G92X#Y# OU G93X#Y# - Estabelece o Zero**

Este comando estabelece as coordenadas que serão usadas para definir o zero de trabalho em relação ao zero absoluto da máquina.

M25 - Início do Padrão

Indica o início de um bloco do programa que será repetido. Todos os comandos tais como furos de suporte, troca de ferramentas, estabelecimento de zeros são normalmente programados antes deste comando.

M01 - Fim do Padrão

Informa o fim de um bloco do programa a ser repetido.

M02X#Y# - Repete Padrão Deslocado

Indica um bloco deslocado definido por M01 e M25. O bloco padrão deslocado contém coordenadas X e Y as quais indicam o deslocamento incremental para o próximo padrão bem como os comandos de modificação de eixos.

M02X#Y#M70 - Troca de Eixos

Troca todas as coordenadas X e Y, isto é as coordenadas X são trocados pelas coordenadas Y e as coordenadas Y pelas coordenadas X. Isto pode ser usado na rotação de uma parte para fazer uso mais eficiente do material da fiação impressa.

M02X#Y#M80 - Imagem Refletida no Eixo X

Usado para produzir uma imagem refletida de um bloco pela reversão do sinal das coordenadas do eixo X, isto é, todos os comandos X mais serão trocados para X menos, e os X menos para X mais.

M02X#Y#M90 - Imagem Refletida no Eixo Y

Idem ao item anterior, só que para o eixo Y.

M08 - Fim do Passo e Repete

Indica o fim de comandos de repetição de bloco padrão. Se todos os padrões repetidos não foram completados, o programa irá reiniciar no último comando de início do padrão. Se todos os padrões foram completados, o programa continuará a execução, encontrando ou um comando de fim de programa ou mais informações do programa. Um comando de fim de programa (M30) pode ser usado neste bloco.

M09(X#Y#) - Parada para Inspeção

Para automaticamente a operação. Se uma coordenada está contida no bloco, a mesa irá mover-se para a posição relativa ao zero absoluto da máquina.

M48 - Cabeçalho do Programa (comando opcional)

Permite a entrada de um cabeçalho do programa para estabelecer parâmetros de operação da máquina e estabelecimento dos dados de ferramenta pré-determinados.

C# - Diâmetro da Ferramenta

Este comando está contido em um bloco de ferramenta para selecionar o diâmetro necessário para um certo ciclo de máquina gravado.

SHRPM do Eixo (definido pelo usuário)

Este comando está contido no bloco de ferramenta para controlar as RPMs de eixo em máquinas equipadas com alimentação automática e opções de velocidade. Quando usada em um cabeçalho de programa, ele é conhecido como pré-programado. Se é usado dentro de uma parte do programa, ele é chamado de velocidade integral.

T# - Seleção da Ferramenta (definido pelo usuário)

Usado para selecionar a ferramenta desejada e estabelecer o índice de compensação da ferramenta. O comando tem quatro dígitos, dos quais os dois últimos são usados para entrada do índice de compensação. O índice de compensação deve ser inserido antes que a compensação seja ligada e não pode ser alterado durante os movimentos de interpolação.

T# - Seleção de Ferramenta

Inicia uma troca automática de ferramenta em máquinas assim equipadas. Nas máquinas sem troca automática de ferramenta ou máquinas com troca automática desligada, irá mover a mesa para a posição de parada. Após o carregamento da nova ferramenta, o operador pressiona o botão de início e a operação é reiniciada.

% - Parada de Rebobinamento

Informa o ponto no qual a fita deve parar de rebobinar. Ele é programado no início do programa seguinte a qualquer informação de cabeçalho e é seguido por um CR (retorno de carro).

COMANDOS ESPECÍFICOS PARA FURAÇÃO

G05 - Modo de Furação

Habilita o modo de furação. Todas as coordenadas sucessivas irão mover a mesa na máxima velocidade para um comando de posicionamento e inicia uma operação de furação.

G82/XHYH/XHYH - Furação para Circuito Integrado com encapsulamento DIP

Define a furação para circuito integrado com encapsulamento DIP.

FH - Velocidade de penetração da Mecânica Z (definido pelo usuário)

Este comando está contido em um bloco de ferramenta quando usado para controlar a taxa de velocidade de penetração da mecânica Z em máquinas com alimentação de velocidade automática e opções de velocidade.

RHXH(YH) - Repete Furo

Este comando define uma série de furos igualmente espaçados a serem furados a partir do último comando de posição. O parâmetro do comando de até quatro dígitos define um número de furos em série, não incluindo o furo original na contagem. As coordenadas X e/ou Y definem o espaçamento.

COMANDOS ESPECÍFICOS PARA ROTEAMENTO

G00XHYH - Modo Roteamento

Habilita o modo de Roteamento. O comando deve conter as coordenadas X e Y para mover a mesa para o ponto de início de contorno (fresamento).

G02 - Modo de interpolação Circular CW (ClockWise)

Liga o modo de interpolação circular e estabelece o deslocamento no sentido horário. A mesa irá se mover para coordenadas sucessivas ao longo de um arco em uma direção no sentido horário em uma velocidade controlada, efetuando um caminho de corte.

G03 - Modo de interpolação Circular CCW (Counter ClockWise)

Idem ao anterior para o sentido anti-horário.

G40 - Desliga Compensação da ferramenta

Desliga a compensação da ferramenta.

G41 - Compensação da ferramenta à Esquerda

Liga a compensação da ferramenta para todos os movimentos sucessivos. O caminho compensado será à esquerda da parte relativa à direção que a ferramenta está se movendo.

G42 - Compensação da Ferramenta à Direita

Idem ao item anterior para compensação à direita.

M15 - Posição de Fresamento do Eixo Z

Provoca um movimento para baixo do eixo Z para a posição de fresamento. O vácuo e o mandril do cabeçote de corte são acionados.

M16 ou M17 - Levantamento do Eixo Z

Provoca o levantamento do eixo Z da posição de fresamento após ter desligado o vácuo e retira a ferramenta da pinça do cabeçote.

F# - Taxa de Avanço da Mesa (definida pelo usuário)

Estabelece a taxa de avanço em polegadas por minuto ou milímetros por minuto, na qual a mesa irá se movimentar.